

ESTUDIO DE VIGILANCIA TECNOLÓGICA Y ESTADO DEL ARTE DE LOS CEMENTOS LC3

NOMBRE: MÓNICA KATHERINE FORERO ROMERO

UNIVERSIDAD CATOLICA DE
COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTA D.C.
2020

ESTUDIO DE VIGILANCIA TECNOLÓGICA Y ESTADO DEL ARTE
DE LOS CEMENTOS LC3

MÓNICA KATHERINE FORERO ROMERO


TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO
CIVIL

DIRECTOR:

CAMILO HIGUERA FLOREZ

INGENIERO ESTRUCTURAL

UNIVERSIDAD CATOLICA DE
COLOMBIA FACULTAD DE
INGENIERIA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTA D.C.
2020

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	Estudio de Vigilancia Tecnológica y estado del arte de los Cementos LC ³	FECHA: 2020 VERSIÓN 0
--	--	--


NOTA DE ACEPTACIÓN:

**FIRMA DEL
PRESIDENTE DEL
JURADO**

**FIRMA
JURADO**

**FIRMA
JURADO**

BOGOTA D.C.

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	Estudio de Vigilancia Tecnológica y estado del arte de los Cementos LC ³	FECHA: 2020 VERSIÓN 0
--	--	--



Atribución-NoComercial-CompartirIgual 2.5 Colombia (CC BY-NC-SA 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:

Atribución-NoComercial-CompartirIgual 2.5 Colombia (CC BY-NC-SA 2.5)

Para leer el texto completo de la licencia, visita:

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.5/co/>

Usted es libre de:



Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra

hacer obras derivadas


Bajo las condiciones siguientes:

- 
Atribución — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).
- 
No Comercial — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.
- 
Compartir bajo la Misma Licencia — Si altera o transforma esta obra, o genera una obra derivada, sólo puede distribuir la obra generada bajo una licencia idéntica a ésta.

CONTENIDO

Pág.

INTRODUCCIÓN	8
1 GENERALIDADES	10
1.1 ANTECEDENTES.....	10
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	12
1.2.1 Formulación del problema.....	12
1.3 OBJETIVOS.....	13
1.3.1 Objetivo general.....	13
1.3.2 Objetivos específicos	13
1.4 JUSTIFICACIÓN.....	14
1.5 MARCO REFERENCIAL	16
1.5.1 Marco teórico	16
1.5.2 Marco conceptual.....	18
1.5.3 MARCO LEGAL.....	23
2 METODOLOGIA.....	24
2.1 ESTUDIO DE VIGILANCIA TECNOLÓGICA.....	24
2.1 ANALISIS DE RESULTADOS.....	32
3 ESTADO DEL ARTE	32
3.1 RESISTENCIA MECANICA	32
3.2 DURABILIDAD.....	36
3.3 HIDRATACION	38

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	Estudio de Vigilancia Tecnológica y estado del arte de los Cementos LC ³	FECHA: 2020 VERSIÓN 0
--	--	--


3.4	COMPORTAMIENTO QUIMICO.....	41
3.5	ANALISIS DE RESULTADOS	45
4	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	46
4.1	CONCLUSIONES	46
4.2	RECOMENDACIONES.....	47
	BIBLIOGRAFÍA	48

LISTA ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Procedimiento del estado de Vigilancia Tecnológica... ..	25
Ilustración 2 validación de Información por ScienceDirect.....	26
Ilustración 3 autores principales según el número de documentos publicados en el tema del cemento LC3	27
Ilustración 4 Mapa de relación entre autores	27
Ilustración 5 Mapa de relación con los 25 autores más importantes.....	28
Ilustración 6 Mapa de relación con las palabras claves de cada artículo / documento publicado.....	28
Ilustración 7 Autores más importantes que han publicado e investigado sobre los cementos LC3	30
Ilustración 8 Mapa de relaciones según los 25 autores principales en el tema cemento LC3	30
Ilustración 9 Mapa de relaciones según las palabras claves de cada artículo / documento sobre los cementos LC3	31

LISTA DE ANEXOS

Validación de Información por ScienceDirect_____	26
Autores principales según el número de documentos publicados en el tema del cemento LC3_____	27
Mapa de relación entre autores_____	27
Mapa de relación con los 25 autores más importantes_____	28

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	Estudio de Vigilancia Tecnológica y estado del arte de los Cementos LC ³	FECHA: 2020 VERSIÓN 0
--	--	--

Mapa de relación con las palabras claves de cada artículo / documento publicado

Autores más importantes que han publicado e investigado sobre los cementos LC3 _____ 30


Mapa de relaciones según los 25 autores principales en el tema cemento LC3 _ 30

Mapa de relaciones según las palabras claves de cada artículo / documento sobre los cementos LC3 _____ 31

LISTA DE DIAGRAMAS

Diagrama de Barras de los Autores vs los Documentos publicados sobre el cemento LC3 29

Diagrama de barras de los Autores vs los documentos publicados en los cementos LC3 31


 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	Estudio de Vigilancia Tecnológica y estado del arte de los Cementos LC ³	FECHA: 2020 VERSIÓN 0
---	--	--

INTRODUCCIÓN

El cemento a través de los años ha garantizado dar una mejor calidad de vida a una sociedad, gracias a sus grandes obras civiles que genera. De acuerdo con algunos hallazgos los primeros cementos se hicieron con cenizas calcinadas entre 7000 y 6000 a.C, pero luego se empezaron emplear las calizas y yesos calcinados para pegar los grandes bloques de piedra que se utilizaban para la construcción de las pirámides [2]. Luego se empezaron a implementar mezclas para rellenar esos muros ya hechos de piedra, pero años después estas mezclas empezaron a utilizarse como material Estructural. Durante siglos la fabricación del concreto se fue mejorando para poder construir civilizaciones que generaran obras como el Coliseo Romano o el Panteón de Agripa, que fueron construidos gracias a la caliza calcinada con arenas finas y rocas de origen volcánico. Hoy en día las conocemos como cemento puzolánicos que día a día proporciona un nivel de vida mejor, con viviendas, vías, puentes, centros comerciales, hospitales, colegios, etc.[2]

El proceso de producción del Clinker se mejoró en el siglo 19 cuando descubrieron que la temperatura de calcinación de cenizas y arcillas es de 1500 °C, lo que generó un impacto positivo en la construcción, pero también se empezaron a aumentar las emisiones generadas por la misma fabricación de Clinker, causando emisiones de CO₂ que poco a poco empezó a contaminar cada vez más la atmósfera.[3] Estos avances le dieron inicio al cemento portland, dándole a esta mezcla una calidad homogénea que ayudó a mejorar el uso de la industria de la construcción donde empezó a hacer el principal material cementante del mundo. [4]

El Clinker es el principal componente del cemento que a la hora de su fabricación produce enormes emisiones de Dióxido de carbono (CO₂) afectando gran parte de la biosfera del planeta, además del polvo residual que contienen materiales pesados y entre otros contaminantes que pueden generar enfermedades respiratorias. [5] Por otro lado, la mezcla del cemento

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	Estudio de Vigilancia Tecnológica y estado del arte de los Cementos LC ³	FECHA: 2020 VERSIÓN 0
--	--	--

portland (CP) se le incorpora aditivos que le dan propiedades de resistencia a la compresión, a la durabilidad y estética, pero durante varios siglos se ha utilizado arcillas calcinas para la fabricación de esta mezcla, pero por su cantidad de material que generan las industrias tienen a producir emisiones contaminantes. [6] Por esa razón se fabrican materiales que mejores o mitiguen esas emisiones para así dar la calidad de vida ecológica al planeta, y por ello se decide realiza un estudio tecnológico y estado del arte para identificar si este material realmente mejora la calidad del aire, suelo, y agua, además de mejorar la calidad de materiales de la construcción de la ingeniería civil.


1 GENERALIDADES

1.1 ANTECEDENTES

La urbanización seguirá acelerándose, impulsando una mayor demanda de cemento y concreto para proporcionar un nivel de vida decente. Si en la actualidad como en el futuro la importancia del cemento provocara mayores consumos energéticos generando gases que dañan el medioambiente como el efecto invernadero. Donde su principal fuente de contaminación es el Clinker, y este material además de ser el más importante a una mezcla de cemento, es el causante de las elevadas emisiones de CO₂ a la hora de su calcinación [3].

La nuevas necesidades del cambio climático provoca que nazcan nuevas ideas sobre materiales ecológicos que ayuden a la reducción del Clinker, como es la creación de nuevas mezclas cementantes, que no alteren la calidad del producto final y donde se obtenga ahorro en costos de producción, más la reducción de CO₂. [7] A continuación se mencionan las más importantes innovaciones con respecto al cemento y mortero


Dr. Karen Scrivener y su equipo de trabajo [8] estudiaron las propiedades y aporte del metakaolín y piedra caliza en el cemento portland (CP), donde sus pruebas fueron en morteros y el desarrollo estructural en pastas por difracción de rayos X y otros estudios. Sus resultados demostraron que se necesita 30% de metakaolín y 15% de piedra caliza, dando mejores propiedades mecánicas a los 7 y 8 días que un PC 100%.

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	Estudio de Vigilancia Tecnológica y estado del arte de los Cementos LC ³	FECHA: 2020 VERSIÓN 0
--	--	--

El cemento LC₃ es un nuevo cemento que propone una alternativa sustentable y amigable al medio ambiente, donde la Dr. Karen Scrivener mejoro la calidad del cemento reduciendo un 40% las emisiones de carbono asociadas a la producción del Clinker, además de su bajo consumo energético, garantiza una mayor durabilidad. Este cemento de arcilla calcinada (LC₃), se puede encontrar de manera abundante y económica. El cemento estará compuesto por 50% Clinker, 30% arcilla calcinada, 15% caliza y 5% de yeso, alcanzando esta mezcla resistencias similares al cemento portland. [9]

El Clinker se fabrica principalmente con caliza, ceniza volante, escorias y puzolanas naturales, estos materiales se vienen reduciendo ya que su nivel de contaminación es muy alto, lo que obliga a crear o buscar nuevas alternativas con estos materiales para la reducción de CO₂. [9] Como estrategia se reutilizan esos materiales (ceniza volante, piedra caliza y escorias) que llegan a aportar propiedades a las mezclas fascinantes ya que reducen el contenido de Clinker en un 50% generando resultados similares que un CP.

Nicolas Alejandro López Y Angie Nathalia Hernandez [10] estudiaron el uso de puzolanas naturales de la región andina de Colombia, para saber si son adecuadas para incorporarlas en la fabricación del cemento, donde sus resultados fueron que el material puro de la ceniza volante no se logra activar rápidamente, por lo tanto ellos proponen que se consideren también utilizar oxido de calcio par que aumente la resistencia en un 30%, al ya tener la mezcla hicieron ensayos de compresión y flexión para así poder comparar los con los del cemento tradicional, dando resistencias muy bajas de 20 a 30 % con respecto al 100% del Cemento Portland.

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	Estudio de Vigilancia Tecnológica y estado del arte de los Cementos LC ³	FECHA: 2020 VERSIÓN 0
---	--	--


1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El cemento Portland se obtiene de la calcinación a 1450°C de piedra caliza, arcilla y minerales, produciendo el Clinker, provocando de esta forma la alta emisión de gases de efecto invernadero que llegan a la atmosfera. Este material es muy utilizado en la construcción, y es por eso que se buscan soluciones para remplazar el Clinker por otro tipo de materiales que permitan hacer las mismas funciones que uno convencional, pero que tengan un menor impacto ambiental.

Este material cementante se mezcla con aditivos como el yeso, para así formar el cemento, esta mezcla da propiedades de resistencia a la compresión, durabilidad y estética, y es aquí donde la Ing. Karen Scrivener da nuevas alternativas de materiales cementantes fabricados con arcillas calcinadas, para mejorar la calidad del cemento con menos porcentajes de Clinker, y con base a esto, este proyecto estará enfocado a un estudio de vigilancia tecnológica y estado del arte de los cementos LC₃. [11] Donde se va a garantizar que la información sea actualizada y analizada adecuadamente, además de que será un cemento amigable con el medio ambiente y económico, a diferencia de un cemento convencional.

1.2.1 *Formulación del problema*

Ya que este proyecto se centra en la vigilancia tecnológica de los cementos LC₃. La pregunta a resolver es: ¿Cuáles son los temas y tendencia en el estudio de las propiedades de los cementos de arcilla calcinada LC₃?

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	Estudio de Vigilancia Tecnológica y estado del arte de los Cementos LC ³	FECHA: 2020 VERSIÓN 0
---	---	--


1.3 OBJETIVOS

1.3.1 *Objetivo general.*

Desarrollo de un estudio de vigilancia tecnológica y un estado del arte de los cementos LC3

1.3.2 *Objetivos específicos.*

- i. Implementar una metodología de selección de fuentes de información de los cementos LC3
- ii. Analizar y validar la información sobre los cementos LC3 utilizando software libre
- iii. Elaboración del estado del arte para el cemento LC3
- iv. Análisis comparativos de los resultados obtenidos de los cementos LC3
- v. Determinar los posibles usos en todas las construcciones de Ingeniería Civil, con el cemento LC3

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	Estudio de Vigilancia Tecnológica y estado del arte de los Cementos LC ³	FECHA: 2020 VERSIÓN 0
--	--	--


1.4 JUSTIFICACIÓN

Reducir el impacto ambiental en la producción del cemento es una tarea que se ha venido desarrollando a lo largo de los años. Existen dos tipos de impacto, los positivos y los negativos. Esos impactos positivos proporcionan un desarrollo económico al país, mejoran la calidad de vida de una sociedad ya sea con obras civiles que transforman una necesidad a una satisfacción, además de que estas infraestructuras generan empleos. Mientras que los negativos se centran más en los cambios que generan estas industrias en los aspectos abióticos como es el suelo, aire y agua, y asimismo la salud de los trabajadores [12]

En el caso del cemento, los impactos positivos incluyen estrategias que mitiguen el impacto que estas industrias realizan, y una de esas tácticas es el manejo que han venido dando a los materiales residuales, incluyendo algunos desperdicios peligrosos, cada uno de ellos se les ha dado una utilidad ya sea neutralizando los como los ácidos de las minas, o esos desechos que son peligrosos como relleno para el asfalto. [13]

Los impactos ambientales negativos ocurren desde que se empieza su proceso de fabricación, causando daños, como en el suelo con los desechos que quedan ya sean sólido o líquidos peligrosos, que generan contaminación, pérdida de recursos naturales, alteración en las fuentes hídricas, degradación en la calidad de los paisajes, hasta los residuos de material generados en obra.[14] En el aire, trae consecuencias como las emisiones de CO₂, ruido, polvo, el uso de combustibles fósiles (carbón, gas y petróleo) que provocan el efecto invernadero, excavaciones y además a los trabajadores les afecta el sistema nervioso central. En los recursos hídricos están asociados por el movimiento de tierra, excavaciones, eliminación de la capa vegetal, además de obras civiles como vías que afectan el flujo y calidad de agua. [8] En la parte de la flora, daña la vegetación en el sitio y alrededores provocando erosión, pérdida de árboles y degradación hídrica, todo esto por la compactación que se le realiza al suelo, además del ruido y polvo que se provoca. En la fauna, durante la etapa de construcción se presenta la destrucción de nidos y madrigueras provocando la migración o muerte de esos animales, además del ruido que los aleja del sitio [12]

En la actualidad, para producir una tonelada de cemento se genera una tonelada de CO₂ la cual ira directamente a la atmosfera, lo que constituye al


 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	Estudio de Vigilancia Tecnológica y estado del arte de los Cementos LC ³	FECHA: 2020 VERSIÓN 0
--	--	--

5 y 8 % del total de las emisiones resultantes de las actividades humanas y sumado a esto, los 1450°C que se requiere durante su periodo de producción, además de la huella hídrica que deja esta producción. [15]

Para mitigar ese daño ambiental, algunos investigadores intentan obtiene nuevos materiales que pueden sustituir el Clinker y que en su producción se reduzca considerablemente esas emisiones de CO₂. Estudios como los que realiza la Dra. Karen Scrivener, plantea sustituir o acoplar el metakaolín y la piedra caliza en el cemento Portland (PC), con base en eso, ella demostró que el 30% de metakaolín y 15% de piedra caliza da mejores propiedades mecánicas que un PC 100%. [8]

El uso habitual del cemento no solamente es la clave para la construcción de edificación, puentes y plantas de tratamiento, sino que también es importante el medio biótico y abiótico. Con base en esto se implementan estrategias innovadoras que transformen o minimicen el porcentaje de producción de Clinker a nuevos materiales más amigables con los ecosistemas, además de que ayudan a potencializar ya sea una empresa o un país [16].

Por lo tanto, en este estudio se investigarán nuevos materiales que permita la interacción en la naturaleza con la infraestructura civil, donde es aquí que esta investigación estudiara los materiales que se acoplaran a una nueva mezcla como una nueva solución y son: la caliza, arcilla calcinada y yeso, tratando de que el contenido de Clinker sea el menor, con el fin de mantener un equilibrio ecológico aún bajo costo en la producción del cemento, además de dar una nueva mirada a un mundo revolucionario en la construcción.

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	Estudio de Vigilancia Tecnológica y estado del arte de los Cementos LC ³	FECHA: 2020 VERSIÓN 0
--	--	--

1.5 MARCO REFERENCIAL


Se presentarán conceptos e investigaciones que apoyen el crecimiento de la construcción para que cada vez sea más amigable con el ecosistema, y esto se realizara si se empieza a modificar el Clinker en los cementos y morteros

1.5.1 Marco teórico

El concreto hidráulico es el material más utilizado en construcción de obras de infraestructura a nivel mundial. Su fabricación surge de una mezcla de agregados gruesos y finas, agua y cemento Portland. Lo anterior constituye al cemento, como el material manufacturado más ampliamente utilizado a nivel mundial, además el cemento es un producto esencial que cubre las necesidades de la sociedad, proporcionando viviendas, infraestructuras modernas y fiables.[17]

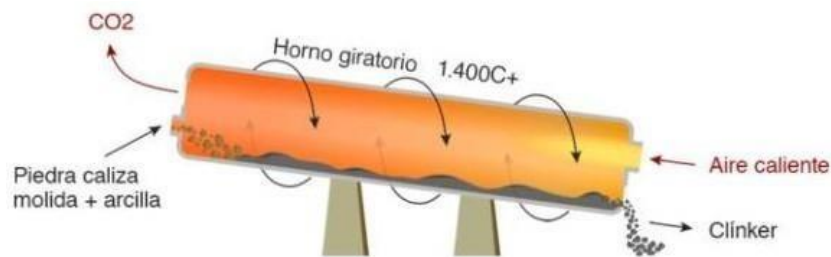
A pesar de sus múltiples beneficios, en su proceso de fabricación se emiten altos niveles de Dióxido de carbono (CO_2), aproximadamente un 7% de las emisiones a nivel mundial son por la producción del cemento, provocando altos gases de efecto invernadero que llegan a la atmosfera. Una de las soluciones a estos gases es poder cambiar el Clinker cementante por otro tipo de materiales que permitan hacer las mismas funciones que uno convencional, ya que esta mezcla cementante permite hacer edificios, puentes, presas hasta construcciones monstruosas, además de que ayuda al desarrollo económico de cualquier país y no solo es eso, sino que es de los mejores materiales para la construcción ya sea en forma de mortero, cemento o concreto.

Estas construcciones van ir aumentando año tras año sin control, por lo que se necesitan nuevos métodos para que la fabricación del cemento no sea tan peligrosa, ya que emiten CO_2 a la atmosfera y además de la cantidad de energía que se consume. Cada industria ha generado estrategias para mejorar la eficiencia energética y de reducir la cantidad de emisiones provocadas, con ayuda de tubos que llevan el CO_2 posible para transformarlo en un gas no tan contaminante.

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	Estudio de Vigilancia Tecnológica y estado del arte de los Cementos LC ³	FECHA: 2020 VERSIÓN 0
---	--	--

El Clinker es la principal materia prima para la fabricación del cemento, por lo tanto, para su fabricación se necesita tener el horno a una temperatura de 1450 °C y a la hora de salir se enfría a 100°C, dicho choque térmico permite que se formen cadenas amorfas que le dan al material sus propiedades cementarias.[18] Sin embargo, ese aire caliente dentro del horno, es CO₂ que se ha generado en el proceso de calcinación de la piedra caliza, y el cual es liberado al ambiente.


Figura 1 Fabricación del cemento - carbón Brief, Chatham House



Las nuevas propuestas de cementos ecológicos o amigables con el ecosistema serán el nuevo futuro de la construcción, ya que dependerá de nuevos materiales ya sean los mismos desperdicios de industrias como las escorias, o materiales reciclados que sean menos contaminantes que un cemento 100% Clinker.[19]

El Clinker es una mezcla de cristales que se componen de otras fases, la primera es el silicato tricálcico que ayuda a endurecer rápidamente, además de su fraguado rápido, el segundo es el silicato de tricálcico que aumenta la resistencia a edades mayores de una semana, además de que hay menos incidencia al calor que el anterior, el tercero es el aluminato tricálcico, aunque esta fase libera mucho calor durante su tiempo de endurecimiento pero esto ayuda a aumentar la resistencia a la temperatura y reacciona rápidamente con el agua, la última fase es la solución sólida de ferrita, aquí comprende y reduce la temperatura aparte de que hidrata rápidamente hasta cumplir con la resistencia del CP.[20]

Los cementos están dando un boom en la tecnología y en la ciencia ya que las innovaciones que se están utilizando o fabricando para la construcción, como bio- hormigón se están utilizando bacterias para la fabricación de

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	Estudio de Vigilancia Tecnológica y estado del arte de los Cementos LC ³	FECHA: 2020 VERSIÓN 0
--	--	--

ladrillos, este método no necesita de nada de combustibles fósiles o calcinación ni lanzar emisiones de CO₂. También tenemos cementos con aditivos que ayudan a evitar porcentajes de Clinker, otros son el nuevo cemento que saca argos que generan 38% menos emisiones y 30% menos energía, o cementos como el LC3, que han reducido los porcentajes de emisiones. [21]Cada uno de ellos se evalúan, para así saber si sus propiedades de los mismos resultados que un cemento, como son: Ensayos mecánicos y de durabilidad


La ceniza volate es un material con alto contenido de aluminio y sílice denominado aluminosilicatos, que quedan libres a la hora de la fabricación del cemento, este material se caracteriza por su granulometría parecida en un 95% a suelos limosos y el otro 5% a las arcillas. Este material es ideal ya que se activa alcalinamente con el cemento dando las mismas propiedades que un CP, tanto mecánicas como de durabilidad. [22] Aunque el porcentaje en la mezcla de este material es bajo (10%) y aun la cantidad de Clinker es elevada, se trata de utilizar otro tipo de materiales para que el porcentaje de ceniza volante sea mayor dando las mismas propiedades físicas y químicas, aunque es más utilizado en asfaltos que en concretos ya que requiere más aditivos o material como metakaolin o cascara de arroz. [22]

Lo que se busca en este material (Ceniza Volante), es una elevación de la resistencia mecánica inicial, baja retracción al secado, y una buena adherencia, además de la resistencia a asidos y al fuego, y en estos dos últimos la ceniza es la ideal. [23]

1.5.2 Marco conceptual

Cemento

El cemento se obtiene de la calcinación a 1450°C de piedra caliza, arcilla y minerales hierro, produciendo el Clinker. [24] El cemento se puede encontrar en dos tipos, los naturales y los artificiales. Los naturales son los que han sido calcinados a los 1000°C, y suelen tener más sílice y aluminio y menos cal, estos cementos se utilizan para obras de albañilería ya que su baja resistencia no sirve para electos estructurales. A diferencia de los artificiales, estos cementos se realizan a temperaturas de 1450 y 1480°C ya que se obtienen a partir de arcilla y caliza, la cual, después de ser calcinados y triturados se consigue el cemento. Tenemos cemento Portland, cemento Puzolánico y Aluminoso, pero también Blancos, Cola y Cementos con

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	Estudio de Vigilancia Tecnológica y estado del arte de los Cementos LC ³	FECHA: 2020 VERSIÓN 0
---	--	--

aditivos. [25]

Cemento Portland

Es un cemento hidráulico que da excelentes cualidades aglutinantes ya que su principal característica es el fraguado y endurecimiento al entrar en contacto con el agua. Además, este cemento al ser mezclado con áridos, agua, y fibras que producen una mezcla resistente. [26]

Existen 5 tipos de cemento portland, cada uno de ellos se caracteriza por su uso y componentes. El cemento normal, es simplemente la mezcla del Clinker y el yeso y se usa en obras de ingeniería. El cemento modificado, es resistente a los sulfatos y adquiere resistencia con más lentitud, y es usado en alcantarillados, tubos y zonas industriales.[26] El cemento consta de una elevada resistencia inicial y resistencia acelerada, en este caso el concreto. Los C3A y C3S tienen un bajo calor de hidratación, este cemento gana resistencia lentamente y se usa en presas, túneles y grandes obras. Y el último tipo se caracteriza por su resistencia a la acción de los sulfuros, y se emplean en estructuras hidráulicas y plataformas marinas [27]

Cemento Pulzolánico


Es un aglomerante hidráulico, que tiene baja resistencia mecánica y fraguado a diferencia de un PC, y su uso es en albañilería. Los puzolánicos son materiales silíceos o aluminosilicatos, como son las rocas o ceniza volcánica y escoria, donde estos materiales al entrar en contacto con el agua reaccionan con el hidróxido de calcio (del Clinker),y así se forma el cementante[28]

Cemento Blanco

Este cemento fue diseñado para uso ornamental o para dar acabados artísticos, también se puede utilizar en estructuras simples. Este cemento presenta las mismas propiedades que el cemento gris, donde da los mismos resultados mecánicos, buena adherencia, trabajabilidad, plasticidad y permite pigmentos de colores.[29]

Cemento con aditivos

Los aditivos principalmente se utilizan para la modificación de las propiedades del concreto o del mortero, se puede adicionar antes o durante

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	Estudio de Vigilancia Tecnológica y estado del arte de los Cementos LC ³	FECHA: 2020 VERSIÓN 0
---	--	--

el mezclado. Estos cementos mejoran el desempeño de una mezcla de concreto, aseguran su calidad en condiciones ambientales en todas sus etapas. [30] Es decir si el aditivo es plastificante, retardante, acelerante, plastificante retardante, plastificante acelerante, súper plastificante, súper plastificante retardante o súper plastificante acelerante [30]

Mortero

Es la mezcla de un aglomerante, agua y arena, dando como resultado un material plástico. Tenemos morteros de yeso, cal, arena y cemento, cal y arena, y mortero de cemento cal, donde los más importantes son los tres últimos.[31]

Mortero de yeso

Este mortero usualmente se usa para fijar elementos de obra, pero no se debe colocar en presencia de humedad ya que el yeso almacena agua. Este mortero tiene menos resistencia que otros morteros, aunque endurece rápido. Su mezcla está dada por yeso, arena y agua.[32]

Mortero de cal


Este mortero tiene menos resistencia, pero tiene gran plasticidad, es flexible y fácil aplicación. Este mortero se usa para la bioconstrucción o la rehabilitación de edificios ya que el material transpira lo que hace regular la humedad del edificio, también en acabados finales en exteriores. Este mortero está compuesto por cal ya sea hidráulica o aérea, arena y agua.[33]

Mortero de arena y cemento

Este mortero es la mezcla de agua, cemento y arena, es usualmente utilizado para enjarres, empastados, detalles de albañilería, pegado de bloques y pendientes pluviales.[34]

Mortero de cal y arena - Mortero de cemento, cal y arena

Estos morteros es la mezcla de cal, arena y agua, es usualmente utilizado para revestimientos de muros y recubrimientos, pero depende de sus cantidades de cal, también para muros ladrillos y muros de mampostería. Este mortero posee gran características plásticas además [31]

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	Estudio de Vigilancia Tecnológica y estado del arte de los Cementos LC ³	FECHA: 2020 VERSIÓN 0
--	--	--

Ceniza Volante

La ceniza volante, aunque es un subproducto industrial que se produce por la calcinación de carbón a altas temperaturas, siempre suelen presentarse como un polvo fino gris, donde sus características granulométricas son parecidas a un 95% suelo limoso y el otro 5% arcilla. Sus características físicas dependen del grado de pulveración, tipo de caldera o la temperatura de combustión. [35] Como es un material que no tiene minerales arcillosos es decir que carecen de plasticidad, con respecto a la compactación

Metacaolín (MK)

Es un material cementante, ya que es un aluminio silicato activado térmicamente (550°C). Este material se mezcla con un activador alcalino para generar una pasta con la capacidad de fraguado y endurecer en periodos cortos, además este polímero inorgánico alcalino posee capacidad de conjugar cualidades específicas en los cementos y hormigón [36]

Yeso

Es un material sulfatado de calcio hidratado, este material es usualmente usando el hormigón ya que evita que fragüe inmediatamente, la adición del yeso no puede superar el 3%, si esto sucede la mezcla se dilatara produciendo fisuras. [31]

Cemento de Arcilla calcinada

Es el nuevo tipo de cemento ecológico, el cual reduce el 30% de las emisiones de CO₂, esto quiere decir que contiene menos Clinker y utiliza menos consumo energético, este cemento es más conocido como CL₃. [37]

Cemento aluminoso

Suele tener un color muy oscuro y una gran finura de molido, este cemento se obtiene mezclando caliza y Bauxita, esta mezcla origina compuestos aluminosos hidratados y son más inertes que lo del cemento portland y no se libera cal. Se usa en ambientes poco agresivos, trabajos en agua de mar y claramente en carácter refractario [38]

Hidratación del cemento

La hidratación depende de la mezcla a utilizar, por ejemplo, la pasta de cemento actúa cuando el Clinker reacciona con el agua, es decir el Clinker forma una pasta gelatinosa que acaba absorbiendo el agua para así poder desarrollarse. Toda mezcla necesita hidratación que sea dinámica es decir durante el transcurso del tiempo la estructura estará con las mejores condiciones mecánicas [4]

Curado

Realizar un excelente curado es el éxito que tendrá la mezcla al pasar el tiempo, ya que un buen curado evita que se fisuren, agrieten, permita el ingreso de agentes que dañen el material o permeabilidad. [39]. Hay diferentes tipos de curado, está la húmeda (mojar el concreto con frecuencia), química (evita la evaporación del agua), térmica (someterlo a altas temperaturas y luego enfriarlo), al aire (vapor de concreto)

Porosidad

Son los vacíos o huecos que se presentan en los espacios no llenados por la pasta de cemento, la porosidad depende de la relación de agua cemento. [40]

Ceniza volante

Son residuos volantes obtenidos de la combustión del carbón pulverizado, por medio de la duración de los gases que salen de la chimenea. [41]

Cemento de aluminato de calcio

Piedra caliza y alúmina, se utiliza en cementos para dar resistencia a temperaturas extremas, ácidos y agua de mar, para su activación se necesita del agua.[42]

Sulfoaluminato

Son materiales ecológicos porque reducen las emisiones de CO₂ a un 34% a diferencia de un cemento Portland [35]

Materiales Puzolánicos

Son materiales naturales como la ceniza volante y humo de sílice, con un bajo contenido de calcio, pero son principalmente silicios vítreos. Este material no tiene propiedades ligantes, pero al entrar en contacto con el agua en presencia de hidróxido de cálcico da propiedades de hidratación iguales al CP. La cantidad que puede contener un cemento portland oscila entre 5 a 40% del contenido de cemento, además de saber qué cantidad de cal se necesita para que pueda reaccionar.[43]

Humo de Sílice

Es un subproducto del silicio metálico, lo interesante de este humo es su diminuto tamaño, donde reacciona adecuadamente con el mortero y hormigones, comportándose como filler debido a su finura. Sus dosis oscilan entre 5 a 10% sobre el peso del cemento [43]

Puzolanas


Son materiales que se consideran eco material o artificial para la producción de cementos que su composición es silíceos o aluminosilicatos, que a la hora de ser molidos y mezclados con la cal la mezcla fragua y se endurece. [44]

Puzolanas artificiales

Estas son resultados de un proceso de industrias o agriculturas, como las arcillas cocida, ceniza de combustible, escoria de alto horno y ceniza de cascara de arroz. [44].

1.5.3 MARCO LEGAL

- NTC 3 Método para determinar la figuración por medio del Blaine
- NTC 107: Ensayos en autoclave para determinar la expansión del cemento
- NTC 108: Extracción de muestras
- NTC 110: Método para determinar la consistencia normal del cemento por aparato vicat

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	Estudio de Vigilancia Tecnológica y estado del arte de los Cementos LC ³	FECHA: 2020 VERSIÓN 0
--	--	--

- NTC 117 Método para determinar el calor de hidratación de cemento portland
- NTC 118 Método para determinar el tiempo de fraguado cemento hidráulico
- NTC 174 Concretos. Especificación de los agregados para concretos
- NTC 220 Método para determinar la resistencia a la compresión del mortero o hidráulico usando cubos de 50mm
- NTC 221 Método para determinar la densidad del cemento hidráulico
- NTC 225 Método de ensayo para determinar la finura del cemento hidráulico
- NTC 396 Método de ensayo para determinar el asentamiento del concreto
- NTC 397 Determinar la finura del cemento portland expuestos a las acciones de los sulfatos
- NTC 454 Concreto. Concreto fresco. Toma de muestras
- NTC 673 Concreto. Ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto
- NTC 1513 método de ensayo para la elaboración, curado aceleración y ensayo a compresión de especímenes de concreto
- NTC 1459 Agua para la elaboración del concreto
- NTC 3318 producción de concreto
- ACI 301M-16 Metric Specification For Structural Concrete
- EN, ISO, ASTM caracterización integral del cemento
- ASTM C618 Especificaciones normalizada para ceniza volante y puzolana natural en crudo o calcinada para usos en concreto
- ASTM C618-19: Especificación estándar para Ceniza volante de carbón y puzolana natural cruda o calcinada para su uso en hormigón
- ACI 232 uso de la ceniza volante en el concreto
- ACI 233 uso de escorias en concretos y morteros
- INVE 402-13: Elaboración y curado de especímenes de concreto en el laboratorio para ensayos de compresión y flexión

2 METODOLOGIA

En esta metodología todos los estudios se basan en un estudio de vigilancia tecnológica inicial que se concentrara principalmente en los artículos y autores mas importantes que estén trabajando en los cementos LC3. Para el desarrollo de esta investigación se utilizó el programa VOSviewer®, para poder allí extraer los 25 autores que más han aportado en investigaciones a estos cementos. Además, gracias a este programa podemos no solo buscar ese autor relevante si no esos artículos que ese autor a aportado al mundo de los cementos LC3, dándonos los más importantes e eliminado copias procedentes del mismo, de igual forma este programa trabaja con barias bases de datos que ayudan a proporcionar la información para que el la seleccione, y en este caso se utilizó ScienceDirect® que proporcione todos los artículos relacionados con los cementos LC3.

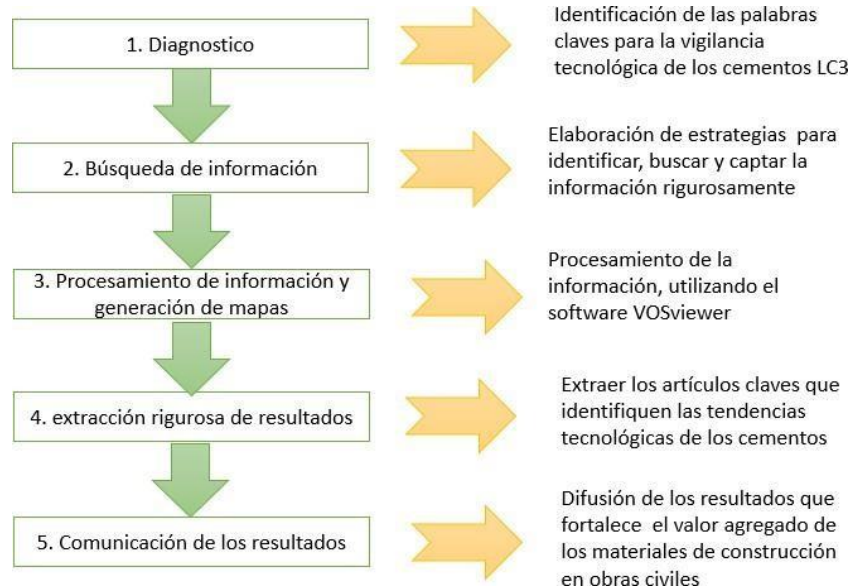
Karen Scrivener fue la clave para que estos cementos LC3 fueran una revolución, ya que ella con su equipo de trabajo logro unir materiales que estaban de cierta forma contaminando el planeta. Ella empezó a investigar la parte química de cada material, dando esa base para que otros laboratorios se involucraran y ayudaran a convertir un material calcinado en un material que da mejores o iguales resultados que un Clinker, y no solo eso a estudiar más materiales que al ser combinados fueran la mezcla ideal para remplazar a los CP. Y es ahí donde este cemento LC3 tuvo vuelo, pero no solo eran estudios químicos si no también resistencias mecánicas a la compresivos, hidratación, contenido de vacíos, durabilidad, pH, edades, etc. Y es así como inicia el estado del arte, porque hay tanta información con diferentes materiales, diferentes resultados, diferentes ensayos para un mismo cemento.

2.1 ESTUDIO DE VIGILANCIA TECNOLÓGICA

El diseño metodológico a utilizar en esta investigación sobre los cementos LC3. Como referente el ciclo de vigilancia tecnológica propuesto es tomar las investigaciones más relevantes o más importantes dependiendo el país o laboratorios, y para ello se utilizará una estructura metodológica conformada

por etapas que facilite la atracción de estos documentos (ilustración 1)

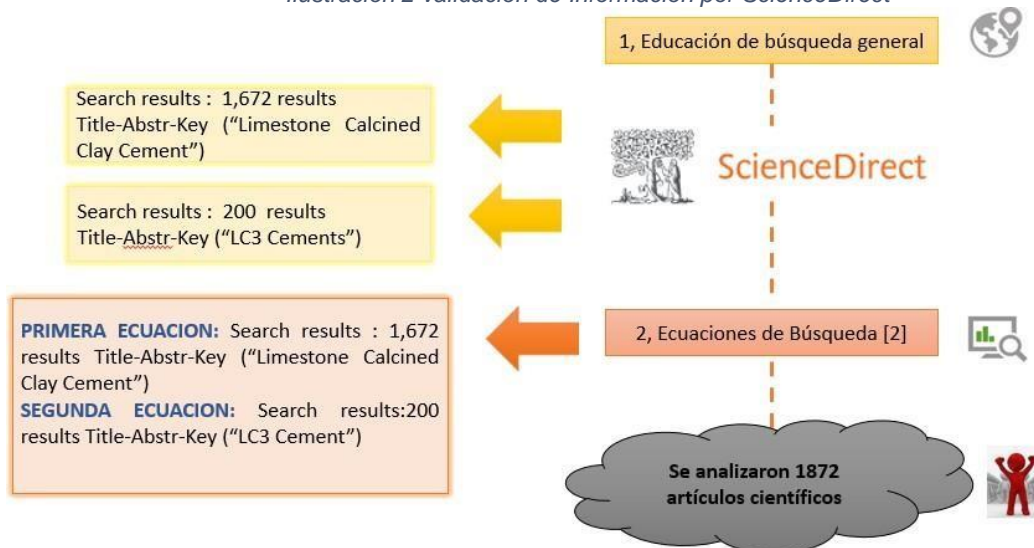
Ilustración 1 Procedimiento del estado de Vigilancia Tecnológica



- **Analizar y validar la información**

Para el desarrollo de esta investigación se utilizó el software ScienceDirect®, donde el proceso de extrusión de información consiste en dos etapas, primero se estudiaron las tendencias investigativas sobre los cementos LC3 como un tipo de ecuación y luego se sigue una metodología rigurosa y de limpieza de datos que son copias de otros artículos, y luego se suben todas esas descargas al programa VOSviewer® (Ilustración 2).

Ilustración 2 validación de Información por ScienceDirect




- **Elaboración del estado del arte y análisis comparativo de resultados gráficos**

Al ya tener diseñado las ecuaciones de búsqueda rigurosas, se generan los mapas estructurados con el programa VOSviewer®, para así poder extraer cuales son los documentos más importantes de lo cementos LC3, gracias a los mapas extraídos con cada una de las ecuaciones.

Primera ecuación de búsqueda generada por la base de datos ScienceDirect. Donde esta base de datos nos generó 1672 artículos que se procesaran en la aplicación VOSviewer para que nos genere mapas de relaciones que nos ayudaran a identificar las tendencias en el campo de los materiales en específico los cementos LC3. En la ilustración 3, nos muestra la ocurrencia de cada artículo con respecto a los autores que han publicado el mayor número de documentos relacionado con los cementos LC3. En la imagen 4 ya se generó la visualización de los 25 autores más relevantes que han investigado sobre este tipo de cementos, por lo tanto, se identificó (ilustración 5) que Bullerjahn, Frank es uno de los más recientes investigadores que en el 2020 ha estado activo en la investigación que inicio Karen Scrivener. Y para finalizar en la ilustración 6 se identifican las palabras claves sobre el cemento LC3, dando relaciones sobre los temas que más se han trabajado, como son: Propiedades mecánica, durabilidad, piedra caliza, Metakaolin, cenizas volantes, cementos industriales y cementos Portland.

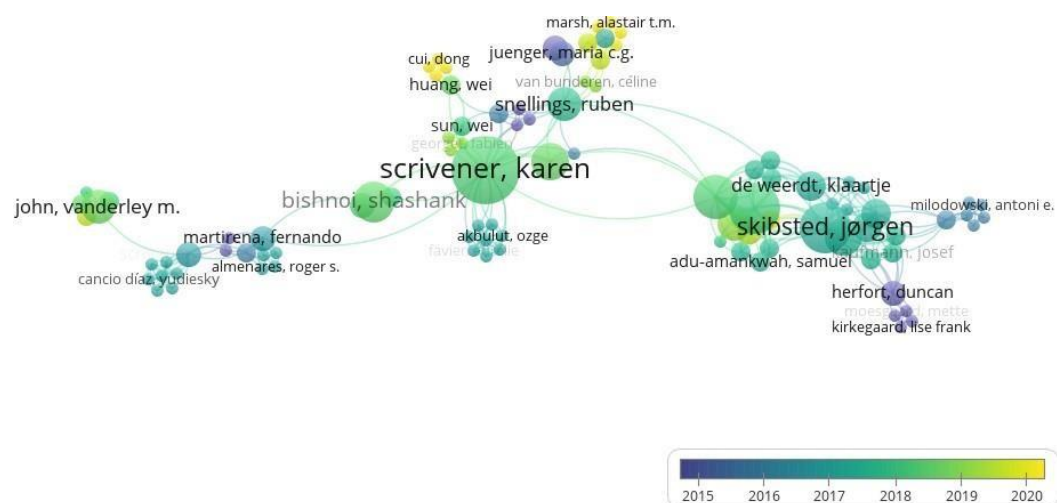
Ilustración 3 autores principales según el número de documentos publicados en el tema del cemento LC3

Create Map ×

 **Verify selected authors**

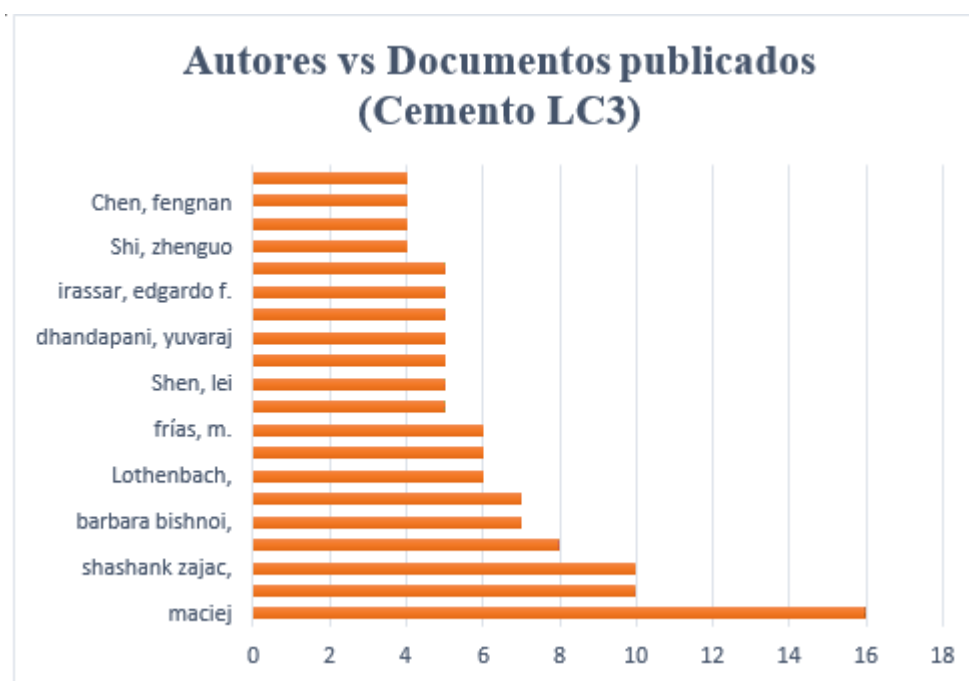
Selected	Author	Documents ▼	Total link strength
<input checked="" type="checkbox"/>	scrivener, karen	16	20
<input checked="" type="checkbox"/>	zajac, maciej	10	35
<input checked="" type="checkbox"/>	skibsted, jørgen	10	34
<input checked="" type="checkbox"/>	ben haha, mohsen	8	33
<input checked="" type="checkbox"/>	santhanam, manu	7	11
<input checked="" type="checkbox"/>	bishnoi, shashank	7	8
<input checked="" type="checkbox"/>	lothenbach, barbara	6	26
<input checked="" type="checkbox"/>	frias, m.	6	16
<input checked="" type="checkbox"/>	avet, françois	6	8
<input checked="" type="checkbox"/>	liu, litao	5	20
<input checked="" type="checkbox"/>	shen, lei	5	20
<input checked="" type="checkbox"/>	skecek, jan	5	20
<input checked="" type="checkbox"/>	irassar, edgardo f.	5	12
<input checked="" type="checkbox"/>	dhandapani, yuvaraj	5	10
<input checked="" type="checkbox"/>	snellings, ruben	5	9
<input checked="" type="checkbox"/>	john, vanderley m.	5	6
<input checked="" type="checkbox"/>	geiker, mette rica	4	21
<input checked="" type="checkbox"/>	shi, zhenguo	4	21
<input checked="" type="checkbox"/>	chen, fengnan	4	18
<input checked="" type="checkbox"/>	de weerd, klaartje	4	18

Ilustración 4 Mapa de relación entre autores



Para la extracción de los documentos que se van a utilizar para realizar el estado del arte serán importados de VOSviewer a Excel, y serán los 20 autores que tengan mayor número de artículos. Para ello se decide hacer diagramas de barras para poder entender mejor la información generada por el programa y así corroborar lo antes mencionado. Donde en el diagrama 1, se identifica mejor que Karen Scriverer es una de las ingenieras que inicio con los cementos LC3 y la que ha tenido mayores publicaciones.

Diagrama 1 Diagrama de Barras de los Autores vs los Documentos publicados sobre el cemento LC3



Segunda ecuacion de búsqueda En la ilustración 7, nos muestra la ocurrencia de cada artículo con respecto a los autores que han publicado el mayor número de documentos relacionado con los cementos LC3, donde sigue siendo la principal la ingeniera Karen Scrivener. En la ilustración 8 ya se generó los mapas que dan la facilidad de la visualización de todos los autores que han investigado en este campo del cemento LC3, donde recientemente se identificó en la parte amarilla los artículos más nuevos, aunque sean del 2017. En la ilustración 9 se identifican las palabras claves sobre el cemento LC3.

Ilustración 7 Autores más importantes que han publicado e investigado sobre los cementos LC3

Create Map X

Verify selected authors

Selected	Author	Documents	Total link strength
<input checked="" type="checkbox"/>	scrivener, karen	7	12
<input checked="" type="checkbox"/>	santhanam, manu	5	17
<input checked="" type="checkbox"/>	tsivilis, s.	4	17
<input checked="" type="checkbox"/>	dhandapani, yuvaraj	4	14
<input checked="" type="checkbox"/>	zhang, shihong	4	10
<input checked="" type="checkbox"/>	avet, françois	4	5
<input checked="" type="checkbox"/>	khodagholi, fariba	3	29
<input checked="" type="checkbox"/>	sharifzadeh, mohammad	3	29
<input checked="" type="checkbox"/>	chaniotakis, e.	3	16
<input checked="" type="checkbox"/>	gettu, ravindra	3	13
<input checked="" type="checkbox"/>	jia, yichao	3	13
<input checked="" type="checkbox"/>	kakali, g.	3	13
<input checked="" type="checkbox"/>	viceconti, marco	3	13
<input checked="" type="checkbox"/>	kucharczyková, b.	3	12
<input checked="" type="checkbox"/>	misák, p.	3	12
<input checked="" type="checkbox"/>	pillai, radhakrishna g.	3	12
<input checked="" type="checkbox"/>	pospíchal, o.	3	12
<input checked="" type="checkbox"/>	bishnoi, shashank	3	7
<input checked="" type="checkbox"/>	li, mingxi	3	7
<input checked="" type="checkbox"/>	sanati, mehdi	2	20

< Back Next > Finish Cancel

Ilustración 8 Mapa de relaciones según los 25 autores principales en el tema cemento LC3

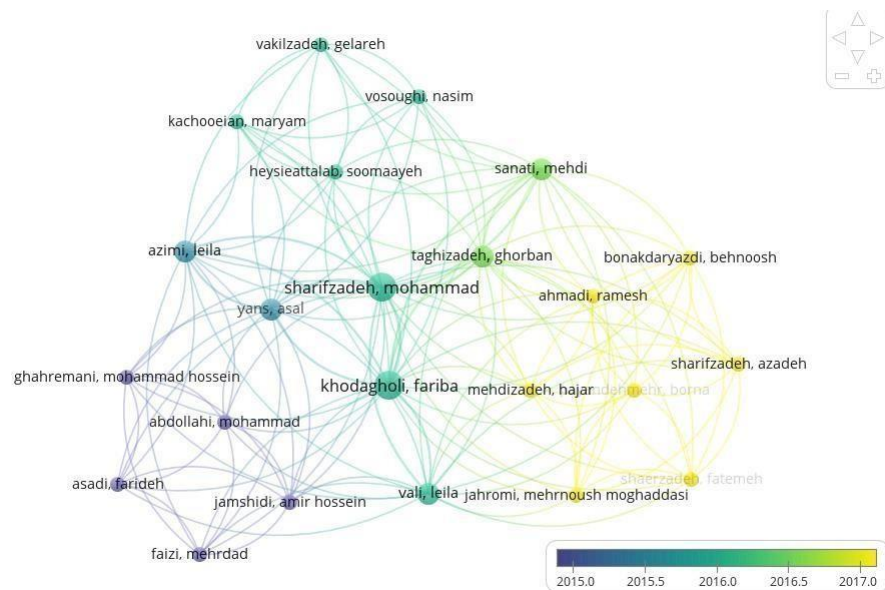
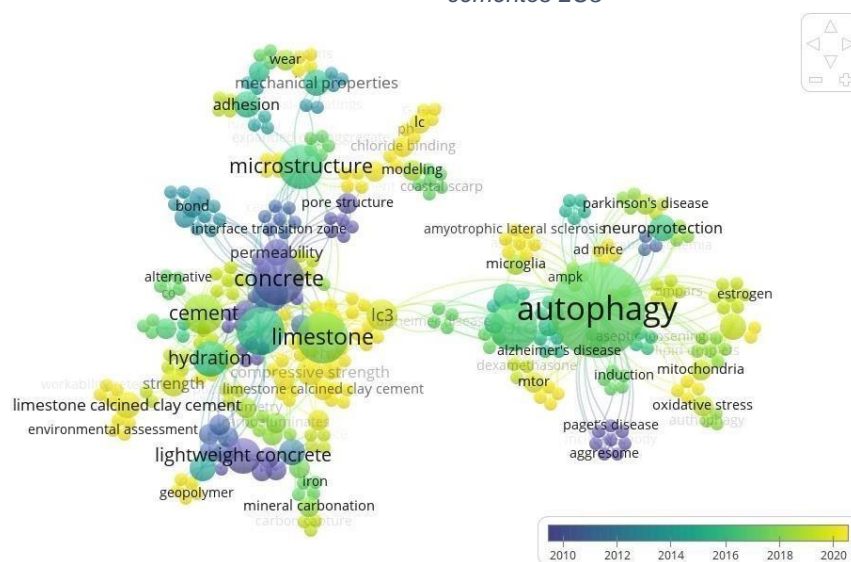
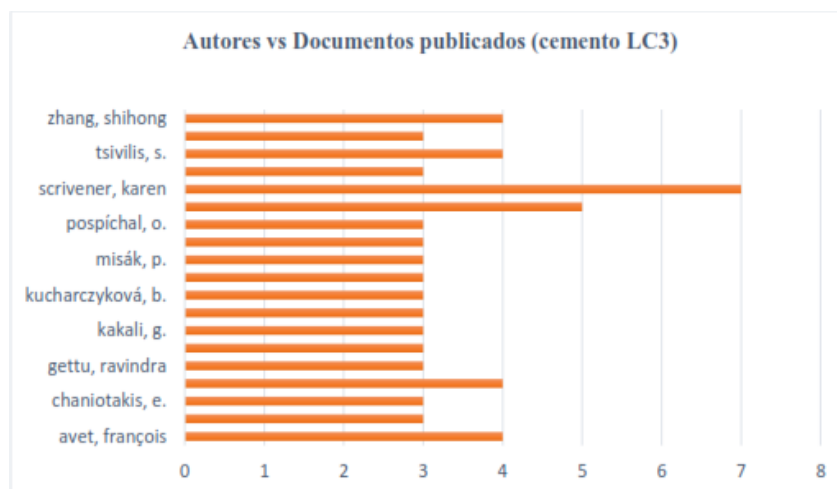


Ilustración 9 Mapa de relaciones según las palabras claves de casa artículo / documento sobre los cementos LC3



Se realiza el diagrama de barras para poder entender mejor la información generada por el programa, y así corroborar con la información antes mencionada. Donde en el diagrama 2, se identifica mejor que Karen Scrivener es una de las ingenieras que inicio con los cementos LC3 y la que ha tenido mayores publicaciones, además es la que dio bases para que otros laboratorios e ingenieros empezaran a investigar sobre estos tipos de cementos.

Diagrama 2 Diagrama de barras de los Autores vs los documentos publicados en los cementos LC3



2.1 ANALISIS DE RESULTADOS

De los 25 autores más relevantes se tomaron los artículos más importantes de cada uno de ellos, teniendo cuidado de que no fueran repetido o una copia. Esto con el fin de poder realizar un análisis más detallado de los aspectos a evaluar con respecto a los materiales que componen este tipo de cementos LC3, además de ver (Ilustración 6 y 9) el nivel de importancia que se le daba al material con respecto a la resistencia mecánica, durabilidad, hidratación y especialmente a la composición química. Por esa razón, se decide enfocar los artículos en estos temas, para así poder generar una conclusión acertada de estos cementos LC3.

Ese número de artículos seleccionados fueron 38, donde se leyó, analizo y se compararon, para así poder ver el enfoque de cada autor y laboratorio con sus diferentes investigaciones. Donde Karen Scriverer es una de las que más ha indagado en estos temas con diferentes laboratorios del mundo generando artículos asombrosos en el comportamiento de los cementos LC3.

3 ESTADO DEL ARTE

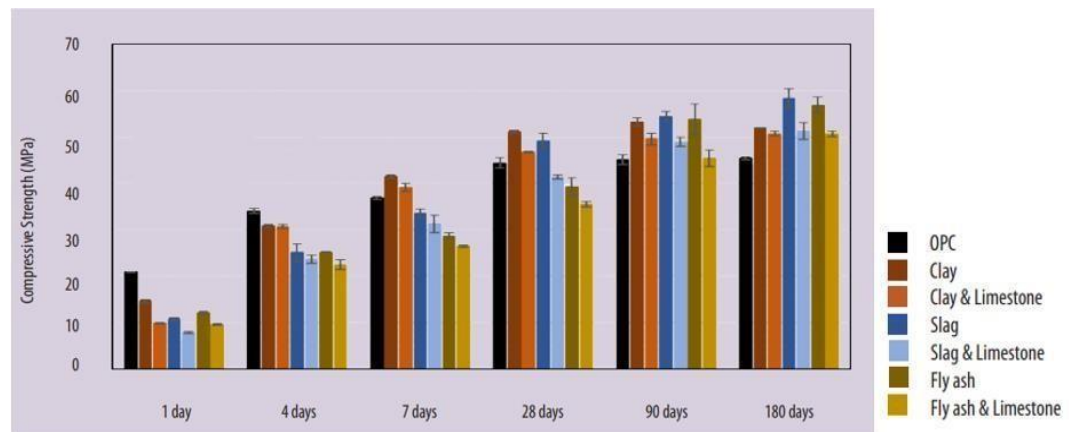
Debido a la importancia de los cementos LC3 en la actualidad, se decide a continuación presentar las investigaciones más significativas en los últimos años en cada uno de los parámetros de los cementos LC3.

3.1 RESISTENCIA MECANICA

La resistencia mecánica es un parámetro que caracteriza sus propiedades mecánicas. Esto quiere decir que depende principalmente de la interacción de sus propiedades, es decir que hay factores físicos y químicos que influyen en el comportamiento de los materiales que conforman la mezcla. Con base a lo anterior, la resistencia depende de la influencia y tamaño de los agregados, de la relación agua-cemento, del fraguado y curado del concreto, además de la temperatura y de la resistencia a la compresión (capacidad de soportar una carga) [45]. Ya que cada uno de estos factores dependen de la resistencia y vida a largo plazo del concreto en condiciones externas que pueden o no afectar ese rendimiento, y es por esa razón que se decidió en esta investigación analizar la resistencia mecánica de los cementos LC3.

Los cementos LC3 (50% de Clinker, 30% de arcilla calcinada, 15% de piedra caliza y 5% de yeso) dan buenos resultados de resistencia mecánica con respecto a un cemento Portland, ya que estos materiales al unirse reaccionan correctamente gracias al contenido de puzolaneidad de la arcilla calcinada de alta calidad, que al romperse sus capas de sílice y alúmina, más la unión con la piedra caliza se genera una activación produciendo resistencias mecánicas a la mezcla.[1] También hay materiales como la escoria, ceniza volante o el metakaolín que al reaccionar con otros materiales proporcionan la activación adecuada para generar una resistencia mecánica parecida a la resistencia generada por el cemento Portland Ordinario (CPO) (figura 2). La resistencia inicial de cementos combinados mejora con respecto a los binarios, esto quiere decir que al ver que la arcilla calcinada está delante de la escoria y la ceniza volante a los 4 días, se puede utilizar como CP.[1]

Figura 2 Comparación de un mortero hecho con CPO simple o mezcla binaria con 30% de remplazo de arcilla calcinada escoria o ceniza volante y una mezcla ternaria cada uno con un 15% adicional de piedra caliza [1]



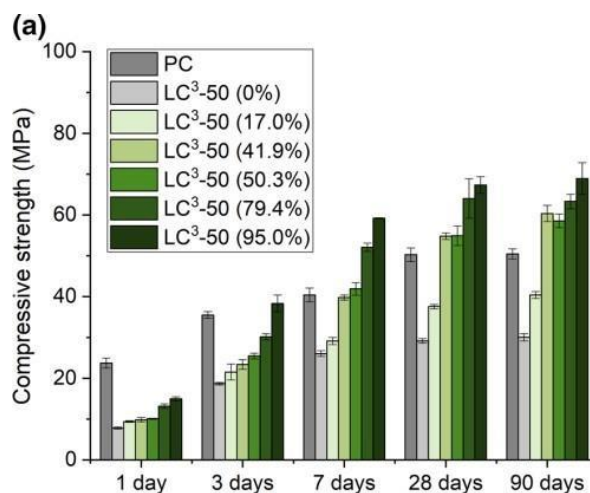
FUENTE: K. L. SCRIVENER, "ECO-EFFICIENT CEMENTS: NO MAGIC BULLET NEEDED," GLOB. CEM. MAG

Pero el uso de la ceniza volante en un 50% proporciona propiedades puzolánicas que podrían mejorar la resistencia a la compresión a largo plazo, pero si se agrega 10% de hidróxido de calcio (HC) la resistencia aumenta hasta ser igual al CP. Esta mezcla se realiza para pastas, morteros y concreto, ya que su comportamiento a la resistencia y a la compresión y porosidad depende de la aplicación del material, esto quiere decir que la

ceniza volante hay que colocarla por agitación o zonificación acuosa, ya que si se aplica el polvo directamente con el hidróxido de calcio (HC) se ve afectado el comportamiento mecánico generando poros [43]. Por otro lado, los mejores resultados se dieron con la pasta y mortero ya que por su composición tienen la capacidad de unir los cloruros a la mezcla, aunque su porcentaje de material es 50% de piedra caliza y 30% de arcilla calcinada, logrando aumentar la solución NaCl y elevar su resistencia mecánica a diferencia de un CP, aunque a largo plazo aumenta la resistencia a la compresión [46].


(Figura 3) La resistencia a la compresión para los cementos LC3-50 y CP en un periodo de tiempo sus resultados fueron: En el día 1 la resistencia fue mayor para el CP que todas las LC3, pero en el día 3 de curado la fuerza de LC3-50 (95% de arcilla pura) era comparable al CP. Después las arcillas con un contenido del 40% a los 7 días su resistencia fue superior al CP, pero los 28 y 90 días de ya estar curado, todas las muestras alcanzaron mayor resistencia que el CP. Excepto la que tenía bajo contenido de caolinita (17%). [46].

Figura 3 Resistencia a la compresión de LC3 -50 en función del porcentaje de arcilla y su edad [46].



FUENTE: H. MARAGHECHI, F. AVET, H. WONG, H. KAMYAB, AND K. SCRIVENER, "PERFORMANCE OF LIMESTONE CALCINED CLAY CEMENT (LC3) WITH VARIOUS KAOLINITE CONTENTS WITH RESPECT TO CHLORIDE TRANSPORT,"

Los concretos autocompactantes utilizan el 13.3% de ceniza volante y 19% escoria, donde este tipo de mezcla generó aumentos en la resistencia

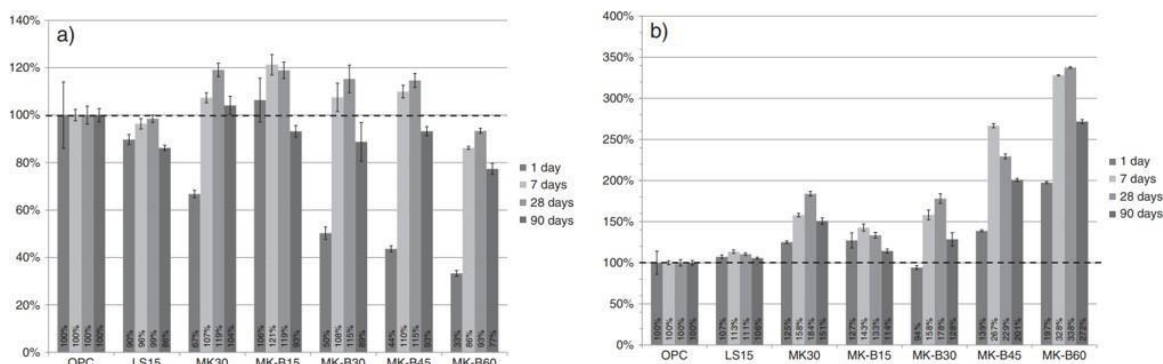
 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	Estudio de Vigilancia Tecnológica y estado del arte de los Cementos LC ³	FECHA: 2020 VERSIÓN 0
--	--	--

mecánica, pero el volumen de poros permaneció igual [47]. Pero los concretos fluidos con altos volumen de ceniza volante, con una relación de A/CM garantizan un concreto con resistencias mecánicas buenas al llegar a los 28 días, dando resultados mejores que un cemento simple [48]. También hay cementos con puzolanas naturales del área andina de Colombia, pero este tipo de material aún no se logra activar, debido a que se debe añadir óxido de calcio para poder aumentar la resistencia a un 30%; sin embargo, a pesar del aumento, las resistencias obtenidas son muy inferiores a los cementos tradicionales, además de su elevada porosidad en el interior del material, lo cual puede repercutir en problemas de resistencia y durabilidad a largo plazo [49]. Para las pruebas de fluencia se debe colocar las cantidades correctas, y así lograr un comportamiento viscoelástico mayor, aunque la variación de porosidad de la mezcla aun no es controlable [50].

Otro material que genera excelentes resultados es el metakaolín ya que proporciona rigidez estructural además de tener excelentes propiedades puzolánicas que logran acoplarse de manera correcta a la piedra caliza generando un material similar al CP [51], los porcentajes que se usan son 30% de metakaolín y 15% de piedra caliza, ya que esta proporción genera un excelente rendimiento a los 7 y 28 días, de forma similar al cemento Portland a los 28 días; pero si se añade a la mezcla una mayor cantidad de metakaolín, los resultados empiezan a aumentar hasta en un 3%, para posteriormente disminuir entre el 90% y 60% [52]. Aunque la complicación es el aumento de poros en la mezcla, ya que sin importar el porcentaje de metakaolín que tenga se van a generar poros, y esto se puede solucionar ajustando el porcentaje de yeso, donde las cantidades varían entre 1.5 y 3% ya que si llega a existir un aumento de contenido de sulfato se pueda controlar la disminución del porcentaje de metakaolín en los primeros 28 días. Aunque a largo plazo los poros aumentan en un 1.5% ya que es difícil poder controlar la reacción que tendrá cada material sobre la mezcla lo que provoca que la resistencia compresión sea baja y muy baja a largo plazo [53]. (Figura 4) La mezcla MK-B15 tiene una resistencia más alta que el CP en todas las edades, pero B30 Y B45 muestra mayor resistencia con respecto a CP a los 7 y 28 días. Estos resultados demuestran que acoplar metakaolín y piedra caliza en los cementos portland pueden ofrecer excelentes rendimientos a edades tempranas, como a mezcla B45% (30% MK y 15%

piedra caliza) produce mejores propiedades mecánicas.

Figura 4 Resistencia a la compresión de las mezclas normalizadas a la resistencia del CP 100% (a) y resistencia cuarzo (b) a los 1, 7, 28 y 90 días



FUENTE: S. A. B. MARIA C.G. JUENGERA, RUBEN SNELLINGSB, "SUPPLEMENTARY CEMENTITIOUS MATERIALS: NEW SOURCES, CHARACTERIZATION, AND PERFORMANCE INSIGHTS,"


En conclusión, en todas las mezclas propuestas para los cementos LC3, la resistencia mecánica y a la compresión son la adecuada en comparación a un CP. Además, este tipo de cementos tienen un mejor rendimiento mecánico y esto es gracias a los materiales que tienen una composición química que reaccionan adecuadamente, aunque haya agentes externos o internos que intentan modificar esos valores. Pero este cemento CL3 con las cantidades correctas en la mezcla logra tener resultados iguales a los CP, pero aun así se seguirán estudiando hasta encontrar que el rendimiento sea superior que los CP sin tener problemas con la porosidad interna al mezclarlo con cenizas volantes. Y para ello se debe estudiar a fondo la composición química para así saber los porcentajes adecuado de cada material que al reaccionar den mayores resistencias que los CP teniendo cada vez menor porcentaje de Clinker. Pero en general la resistencia de los cementos LC3 son las adecuadas para ser comercializado. [54]

3.2 DURABILIDAD

La durabilidad es la vida útil que tiene un concreto de conservar inalteradas sus condiciones físicas y químicas, cuando es sometido a cargas externas o condiciones ambientales, ataques químicos, abrasión y cualquier otra acción de intemperie. Ya que para garantizar la durabilidad a largo plazo depende de las condiciones que es sometido el concreto, y para lograr ese objetivo se pueden usar diferentes tipos de aditivos, pinturas epóxicas o un cambio de diseño de la mezcla, para así garantizar la durabilidad del concreto. [55] Es por esta razón que se decide analizar la durabilidad de los cementos LC3 y poder garantizar o no que este tipo de cementos es ideal.

La durabilidad de las mezclas de cemento LC3, dependen de la fuente de extracción del material, esto se debe a que cada arcilla tiene un porcentaje diferente de caolinita que pueden reducir o aumentar la durabilidad. Además, uno de los problemas más importante en el concreto es la corrosión debido a la entrada de iones de cloruro que provocan afectaciones en la durabilidad del material.[46] Por lo tanto, comprender las características físicas y químicas de los concretos con nuevos materiales cementados que garantizarán la durabilidad a largo plazo, además de las fases de los hidratos que mejora la unión de los cloruros. Pero para este tipo de cementos LC3 la unión química de iones de cloruro son muy reactivas, por lo que se utilizó solo 35% de metakaolin puro en arcillas calcinadas, dando mejoras significativas en morteros, ya que existe un aumento de cloruros en la mezcla, provocando resistencia al sistema del material, aunque en concretos tiende a variar, pero después de 1.5 años de exposición da mejores resultados que el CP a largo plazo. [46] Es decir que el uso de arcilla de alto horno no es necesario para obtener una buena durabilidad, por lo que los cementos LC3 proporcionan buena durabilidad si la materia prima es la adecuada.


Los avances de los cementos alternativos, como son los cementos de aluminio de calcio, cemento de sulfoaluminato de calcio, cementos alcalinos activados y cementos supersulfurados, se han convertido en una alternativa importante para mejorar los materiales de construcción [56]. Pero el problema de utilizar aglutinantes es poder identificar el rendimiento de cada uno a la hora de mezclarse, por lo tanto, los diferentes resultados que se han

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	Estudio de Vigilancia Tecnológica y estado del arte de los Cementos LC ³	FECHA: 2020 VERSIÓN 0
--	--	--

obtenido en varias investigaciones han mostrados que el uso de cementos aluminosos aumenta la resistencia a la abrasión, además de su endurecimiento rápido y una mayor durabilidad. Para el caso del Cemento de sulfoaluminato de calcio, el cual se usa principalmente en concreto pretensados. Este concreto por el proceso constructivo que tiene es posible controlar la temperatura, logrando apreciar el PH, y su baja porosidad, lo cual le da unos buenos rendimientos en cuanto a durabilidad del material.[57] Los aglomerantes son los ligantes activados alcalinamente, los cuales han demostrado poseer buena resistencia y durabilidad, siendo uno de los que más se están estudiando en la actualidad, debido a sus propiedades alcalinas que logra buenos índices de desarrollo de fuerza que un CP. Finalmente, se tienen los Cementos Supersulfatados, los cuales son casi completamente libres de Clinker Portland, donde su principal característica es su alta resistencia, aunque su PH es mucho más bajo y esto provocaría que su durabilidad se va a ver afectada en el futuro [56].

Por otro lado, el uso de cenizas volantes proporciona beneficios, aunque por su exceso de puzolanidad podría afectar el PH del cemento, sin embargo, utilizar este material mejora los aspectos de durabilidad, en especial cuando se utilizan en concreto, ya que al utilizar un 50% de ceniza volante y 10% de hidróxido de calcio,

[43] la reacción puzolánica generada mejora los parámetros de durabilidad de las mezclas. Así mismo, la implementación de concretos fluidos con alto contenido de ceniza volante, dan excelentes resultados de durabilidad, lo cual se debe a que el uso de aditivos para alcanzar la consistencia de la mezcla, reducen la porosidad de la misma [47]. Por otro lado, el uso de cenizas volantes como las colombianas, se ha encontrado que brinda mejoras en las propiedades de durabilidad frente al ataque de iones de cloruro en mezclas de concreto, aunque el uso de materiales ternarios que incluyan escorias, humo de sílice, u otros materiales que ayudan significativamente a la ceniza volante a mejorar las propiedades de la mezcla [58]


 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	Estudio de Vigilancia Tecnológica y estado del arte de los Cementos LC ³	FECHA: 2020 VERSIÓN 0
--	--	--

Así mismo, la Arcilla calcinada a diferencia del Clinker Portland, mejora la durabilidad de los cementos LC3 en un 40%, lo cual se debe a que por su bajo contenido de calcio mejora la capacidad de iones para unirse y reaccionar con el Clinker durante la carbonatación [51]. Para terminar lo anterior indica que, sin importar el material suplementario a utilizar, la durabilidad de las mezclas de concreto o mortero no debe ser un problema, si se determinan las cantidades correctas en cada mezcla

De acuerdo a lo estudiado los cementos CL3 funcionan siempre que tenga composición química adecuada para que la resistencia mecánica tenga excelentes resultados y así la durabilidad sea exitosa. Pero si la composición química de algún material no es la adecuada, como por ejemplo la de la arcilla calcinada, donde sus características no tienen gran porcentaje de pozulaneidad significa que no se va a logra activar el PH causando que la durabilidad no sea la ideal. Pero como soluciones a esa arcilla que no tiene buenos resultados se puede adicionar algún tipo de aglomerantes y hay si la durabilidad puede mejorar, pero no se asegura que a largo plazo si llega haber un ataque de iones de cloruros la durabilidad siga igual. En conclusión, es mejor obtener una arcilla de alta calidad y así obtener un cemento CL3 adecuado.

3.3 HIDRATACION

El proceso de hidratación es de vital importancia, ya que este material al mezclarse con el agua, reacciona y empieza a generar una mezcla aglutinante, y esto se debe a los procesos químicos responsables de generar el calor de hidratación. Esto quiere decir que los materiales que componen la mezcla como el yeso proporcionan características particulares en cuanto al color, fraguado y reacciones al contacto con el agua, además se tiene presente la temperatura del lugar donde se elaborara el concreto, con el fin de tener controlado el desarrollo del calor de hidratación dentro de la mezcla. Por lo tanto, se estudian los minerales de Clinker por separado, para identificar su comportamiento diario. [59] Es por esa razón que se decide revisar en las investigaciones ya propuestas sobre el cemento LC3, si ese

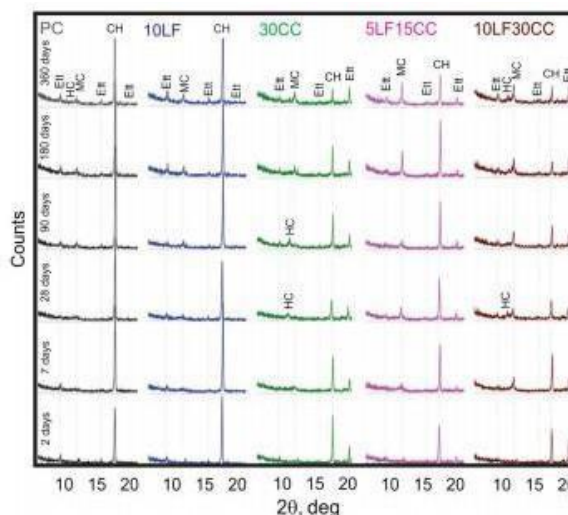
 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	Estudio de Vigilancia Tecnológica y estado del arte de los Cementos LC ³	FECHA: 2020 VERSIÓN 0
--	--	--

proceso químico entre minerales proporciona la hidratación necesaria para este tipo de cementos.

Las fases de hidratación para CP y cementos que contiene arcilla calcinada caolinítica (CC) en un 44%, fueron estudiados por un periodo de 2, 7, 28, 90, 180 y 360 días, donde los resultados de hidratación para CP aumentaron durante los primeros 28 días y luego permanece constante. Pero para CC disminuyó durante los 28 días, pero permaneció constante hasta los 360 días.[60] Esto ocurrió porque los CP tiene el volumen de poros más bajo lo que provoca mayor resistencia a la compresión e hidratación, pero a diferencia de los cementos CC sucede lo contrario, y la solución fue colocar partículas puzolánicas finas para estimular la hidratación de la mezcla afectando la estructura de los poros, dando resultados favorables a los 2 días cuando aumenta ligeramente la hidratación y disminuye el volumen de poros, lo que contribuye a la durabilidad del material. Este estudio demostró que los efectos de la mezcla puzolánica son importantes a los 2 y 7 días, ya que el resultado puzolánico del material reacciona con el contenido de hidróxido de calcio de la misma, dando la posibilidad de identificar edades posteriores de hidratación logrando igualarse a los resultados de los CP.[60]

(Figura 5) Los patrones de hidratación para los cementos que contienen CC (arcilla calcinada) aumentan hasta los 28 días y luego permanecen constantes, sin embargo, disminuye con la edad de hidratación. Mientras que para los cementos (5LF15CC y 10LF30CC) elaborados con LF (piedra caliza) y CC aumento considerablemente a los 7 días el pico de CH (hidróxido de calcio y otras con baja intensidad a los 28 días. [60] Esto indica que la pasta que contiene el 30% de CC consumió más CH que la que tiene 10% LF, es decir que la hidratación no depende tanto de la reacción puzolánica en edades posteriores, siendo la arcilla calcinada con mejores resultados parecidos al CP.


Figura: 5 Patrones de XRD de pastas hidratadas a los 2, 7, 28, 90, 180 y 360 días [60]



FUENTE: C. E. ALEJANDRA TIRONI, PH.D; ALBERTO N. SCIAN, PH.D; AND EDGARDO F. IRASSAR, "BLENDED CEMENTS WITH LIMESTONE FILLER AND KAOLINITIC CALCINED CLAY: FILLER AND POZZOLANIC EFFECTS," ASCE, 2017.

La fabricación de los cementos LC3 debe ser rigurosa ya que si se añade mayor porcentaje de Clinker a los 3 días hay una desaceleración de la hidratación y los poros empiezan a aumentar, pero si ese porcentaje es de caolín, el material se superplastifica provocando mejoras en la hidratación gracias a la calcinación y a la piedra caliza, pero se genera un retraso ligero en el periodo de inactividad a largo plazo [#]. Aunque si se usan sulfatos (yeso) se debe tener presente el pico de aluminato, ya que puede generar una disminución o aumento del mismo provocando cambios en la cinética de la reacción, induciendo a una disminución de la hidratación. Pero si la cantidad de sulfatos es la adecuada durante los primeros 28 días, la hidratación será igual al CP [61].

Por otro lado, la reactividad de los materiales cementosos suplementarios tiene limitaciones en barreras termodinámicas y cinemáticas que no están resueltas. Y este problema se debe a los altos grados de hidratación que podrían frenar la reacción del agua. Aunque se encontró una solución como el vidrio, ya que tiene componentes similares a las cenizas volantes o escoria, que generarían mejoras en la parte geoquímica y termodinámica de la mezcla, proporcionando un mayor rendimiento físico, de eficiencia, durabilidad y huella ambiental, aunque su hidratación aun no es similar a los

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	Estudio de Vigilancia Tecnológica y estado del arte de los Cementos LC ³	FECHA: 2020 VERSIÓN 0
--	--	--


CP [62]. También las cenizas volantes son una solución ya que al usarlas en concreto se mejora la trabajabilidad de la mezcla, logrando disminuir el calor de hidratación y la huella de carbono [40]. Además las arcillas calcinadas y la caliza generan a los 8 días excelente hidratación ya que el material tiene la cantidad necesaria de puzolaneidad, pero a largo plazo es incierto si aumente la hidratación o no, ya que todo depende de la composición química del material [63].

Si comparamos los cementos portland con los cementos LC3, tienen un poco de complejidad ya que el calor de hidratación depende de las características químicas de los materiales, además como estos cementos LC3 reducen el contenido de Clinker en un 50% quiere decir que el material que se utilice debe tener un buen porcentaje de caolín para que la pasta se logre plastificar, asimismo el contenido ideal del yeso es del 5% ya que si hay más o menos sulfato va a variar la hidratación y en ninguno de los dos casos los resultados serían parecidos al cemento portland ni a corto ni a largo plazo. Lo ideal de esta mezcla es tener el volumen de poros lo más bajo posibles para tener mejor hidratación que un CP, y para lograr eso depende de la composición química de los materiales, donde este cemento LC3 logra cumplir y ser mejor que el CP.

3.4 COMPORTAMIENTO QUIMICO

El cemento es un conglomerante hidráulico, es decir que se compone por materiales inorgánicos que al unirse con el agua producen una pasta que fragua gracias al proceso de hidratación y luego endurece proporcionando resistencias y estabilidad. Es por esta razón que revisar como interactúa cada mineral dentro de la mezcla es fundamental para poder tener una pasta exitosa y no un desperdicio de material, además al tener ese comportamiento químico ya se puede hacer una dosificación y mezcla para así evaluar la hidratación, resistencia mecánica y la durabilidad.[64] Es por esta razón que se revisará y se analizará el comportamiento químico de este cemento LC3 de tipo suplementario.

Los procesos para poder activar una mezcla de cementos suplementarios (como son los cementos LC3) siguen en estudio, debido a que todos sus materiales pueden reaccionar de diferentes maneras, es decir, si se tomara

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	Estudio de Vigilancia Tecnológica y estado del arte de los Cementos LC ³	FECHA: 2020 VERSIÓN 0
--	--	--

una muestra de arcillas, piedra caliza, ceniza volante, hasta el propio Clinker de distintos países del mundo su composición es diferente, por lo tanto, sus resultados también. Por ejemplo, las arcillas de Chile tienen un porcentaje de caolinita del 30%, más minerales como el cuarzo y la calcita, esto quiere decir que tiene exceso de calcio por lo que hay que aumentar el porcentaje de caolinita, y aun así hay que adicionar algún tipo de coadyudantes que logre mejorar y reactivar la parte puzolánica del material además de su eficiencia [51]. A diferencia de las arcillas rojiza de Guajarat en el occidente de India, tiene un alto contenido de hierro más un 58% de caolinita, aunque tiene mayor porcentaje de caolinita no significa que se eviten los problemas de eficiencia, lo que se hace es añadir coadyudantes o un análisis de PH [65]. Aunque la eficiencia no sea la esperada (mayor) en comparación de un cemento portland, la mezcla función. En India este tipo de material se usa en bloques de pavimentos, tejas, concretos y morteros, pero su funcionamiento solo es ideal por el momento a corto plazo ya que a largo plazo las viviendas ya construidas siguen en estudio [66].

Los cementos LC3 contienen materiales como la piedra caliza y arcilla caolinita, que tienen como característica su diversa pureza (contenido de colinita). Este material cementante logra una buena resistencia al transporte de cloruros en mezclas de mortero y pastas, cuando se reemplaza el Clinker en un 50% por estos materiales (piedra caliza y arcilla caolinita), mejoran la estructura de poros a diferencia de un CP, es decir que su durabilidad va hacer mejor [67], además si se logra que la mezcla tenga una relación de 2:1 de arcilla calcinada a piedra caliza, da mejores resultados de resistencia a la compresión sin afectar la estructura de poros. Pero aun así existe una amplia gama de arcillas y contenidos de caolinita calcinada que varían según la unión de cloruros que tenga el material. Para identificar ese nivel de pureza de una mezcla, se puede evidenciar cuando la unión de los cloruros cambia al tener contacto con la caolinita calcinada. Pero en general si se tiene la composición química de cada uno de los materiales, ya se puede empezar a diseñar un mortero o un concreto, ya que al utilizar arcilla calcinada o piedra caliza da las propiedades químicas ideales para mejorar la durabilidad, resistencia mecánica y a la compresión [67]

Figura 6 cantidad de cloruro absorbido en C-A-S-H normalizado por la cantidad de C-A-S-H formado para CP, LC3-50 (17%), LC3-50 (50.3%), LC3-50 (93%) en NaCl 2M [68]

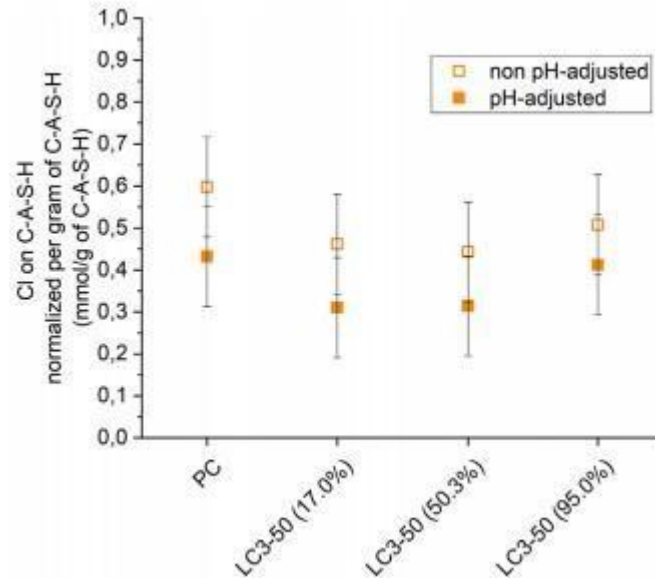
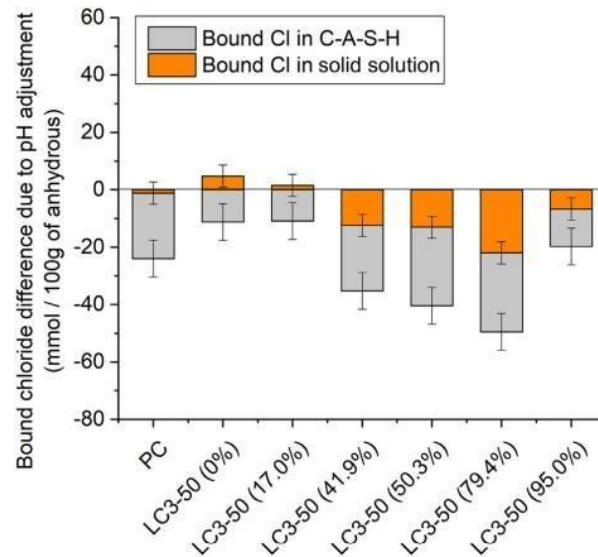



Figura 7 Diferencia de distribución de cloruro con el ajuste a NaCl 2M




FUENTE: F. AVET AND K. SCRIVENER, "INFLUENCE OF PH ON THE CHLORIDE BINDING CAPACITY OF LIMESTONE CALCINED CLAY CEMENTS (LC3)," CEM. CONCR

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	Estudio de Vigilancia Tecnológica y estado del arte de los Cementos LC ³	FECHA: 2020 VERSIÓN 0
--	--	--

(Figura 6) el ajuste del PH sobre la absorción de la muestra, siendo menor cuando la absorción de cloruros cuando el pH esta alto, se observa que sin depender el aglutinante a usar el cambio es el mismo. Además, a mayor sea el CASH formado, mayor la cantidad y cloruros, pero si es lo contrario aumenta el pH y absorbería mayor cantidad de iones de potasio, y estos podrían remplazar a los iones de calcio, lo cual disminuiría la carga superficial y en consecuencia una menor capacidad de absorber iones negativos. Pero en la (figura 7) en la disminución de cloruros en la mezcla CL3-50 ,40 -80% de caolinita calcinada, aumenta la formación de la hidratación y a la resistencia. [68]

Este tipo de cementos LC3 dan buena resistencia a los cloruros, ya que evitan la lixiviación en la mezcla, es decir, si estas mezclas presentan un alto contenido de PH hay una disminución de cloruros [68] (figura 6). Por otro lado, la absorción de cloruros aumenta cuando se utilizan una relación a 2:1 de arcillas caolinitas con piedra caliza, más el cambio del Clinker en un 40% por estos materiales. Esta relación genera un aumento de la concentración de la solución de NaCl, es decir que el cambio de PH no tiene un impacto significativo en morteros o concretos a largo plazo [67], es decir que este tipo de cementos da excelentes resultados en términos de resistencia a los cloruros en comparación al CP. [68]

El contenido de caolinita en una arcilla nos dice si es adecuada o no. En este caso el mínimo contenido adecuado de caolinita es de 40% ya que si esa arcilla tiene más del 60% no existe una ventaja real a largo plazo para ese contenido de caolinita, además con un 40% de arcilla mejora la trabajabilidad, resistencia a los cloruros y al sílice [69]. Por otro lado, poder equilibrar los sulfatos (yeso) depende de la temperatura (20°C), la hidratación y las fases amorfas, ya que puede controlar la reacción del aluminio tricálcico (C3A) o de silicatos tricálcicos (C3S), que reaccionan con el sulfato añadido a la mezcla [69]. En el caso de C3S reacciona rápidamente con el yeso provocando un agotamiento más temprano, aunque aumenta su hidratación. A diferencia del C3A no existe ese agotamiento ya que reacciona más lento, pero aun así la dilatación aumenta al igual que la pureza que conduce a un desplazamiento y disminución del sulfato, en el C3S, aunque ocurre lo mismo, llega con mayor velocidad a ese punto de aluminato, provocando que

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	Estudio de Vigilancia Tecnológica y estado del arte de los Cementos LC ³	FECHA: 2020 VERSIÓN 0
--	--	--


aumente o disminuya el yeso para ambos casos. [61]

En general la sustitución del Clinker por arcilla calcinada en un 30% y un 15% de caliza, se obtiene no solo una reducción significativa de las emisiones si no que los resultados de resistencias y fuerza son mayores que al tener un cemento con el 100% de Clinker, y esto se debe a que la composición química de ambos materiales son los adecuados. Las arcillas calcinadas si tienen un buen porcentaje de caolinita, pero si sus demás componentes están escasos, por ejemplo, la sílice y el aluminio, se añade un coadyudante para que la pasta se reactive con la puzolaneidad más rápido, pero si no se utiliza un coadyudante la activación ocurre, pero será lenta, aunque da buenos resultados, no iguales que un CP, pero son buenas. También es importante el nivel de pureza, ya que dependen de la cantidad de cloruros para evitan la lixiviación en la mezcla, y para lograr que eso ocurra desde el inicio se debe controlar los altos contenidos de PH, puesto que disminuyen el contenido de cloruros y a la hora de entrar en contacto con la caolinita calcinada no se tendrían buenos resultados. Por lo tanto, los contenidos ya establecidos de material para estos cementos LC3, como son las arcillas trabajadas en India y cuba son las correctas ya que generan mejores resultados que los cementos portland.

3.5 ANALISIS DE RESULTADOS

Los cementos LC3 tienen la complejidad de tener una composición química reactiva, y esto se debe al material, ya que depende de su calcinación o del banco de material donde se está adquiriendo, pero cada uno de estos materiales se les realizan pruebas donde se encontraban que había gran cantidad de resultados que al ya estar lista la mezcla funcionaban sin importar su porcentaje de material, como es el caso de las cenizas volantes y el metakaolin, pero si se tenía repercusiones con su edad.

Los resultados principalmente dependían de que tan reactiva es la arcilla calcinada y no solo eso, también depende que los porcentajes de calcio, aluminio y sílice que pueden llegar a retardar o acelerar la activación con los demás materiales. Pero estos cementos LC3 se les realizaron varias pruebas con diferentes arcillas y cantidades, pero solo el porcentaje adecuado para las arcilla calcinada es de 30% ya que con esta cantidad no produce

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	Estudio de Vigilancia Tecnológica y estado del arte de los Cementos LC ³	FECHA: 2020 VERSIÓN 0
--	--	--

reacciones no deseadas a corto ni a largo plazo, aunque los bancos de este material que son los adecuados por el momento son los que quedan en África, Asia y América Latina, ya que proporcionan la composición química ideal, además estos cementos necesitan caliza para que la arcilla realmente se pueda reactivar adecuadamente, ya que dependen en una relación de 2:1, es decir que se necesita el 15% de caliza para un 30% de arcilla calcinada. También es necesario usar yeso, ya que ayuda a regula y agiliza los procesos de hidratación en mezcla, donde en este tipo de cementos el porcentaje ideal es del 5%, y por último se debe añadir Clinker en un 50%, pues es inevitable no usarlo ya que este material genera resultados muy buenos, aportándole a la mezcla resistencias. Es decir que estos cementos LC3 son ideales para empezar a construir obras civiles con materiales que tiene propiedades similares o superiores a un CP, además de ser amigables con el medio ambiente, aunque siga en pruebas.


4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 CONCLUSIONES

Los cementos mezclados con caliza, yeso y arcilla calcinada proporcionan resultados de resistencia, durabilidad y porosidad parecidas y mejores a los 7 días que un CP. Por eso los cementos LC3 (cementos de arcilla calcinada) son la nueva alternativa inteligente para la sustentabilidad ambiental ya que reduce en un 40% la emisión de CO₂.

En el estudio de vigilancia tecnológica se encontró que los temas más tratados en los cementos LC3 son: Composición química, porosidad, durabilidad y resistencia mecánica y a la compresión. Y esto se debe a que el material principal (arcillas calcinadas) es tan reactivo cuando llega a altas temperaturas que se rompe la capa de sílice y la de alúmina que hacen reaccionar la pasta, o cuando se le agrega piedra caliza para que de hidratos llenen esos espacios que se generan en la mezcla.

Es por eso que el estudio de este cemento depende inicialmente de la composición química de cada uno de los materiales a utilizar y así saber si proporcionan los mismos resultados que el Clinker en los cementos o


 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	Estudio de Vigilancia Tecnológica y estado del arte de los Cementos LC ³	FECHA: 2020 VERSIÓN 0
--	--	--

concretos para llegar hacer remplazado o no en un 50%. Donde estos materiales deben contener calcio, aluminio y sílice, ya que una mezcla con estos elementos ayuda a reducir las emisiones de CO₂ del planeta. Por ejemplo, el uso de la arcilla calcinada proporciona una respuesta en la disminución del factor del Clinker en un 30 y 40%, ya que contiene caolín que está formado por sílice y aluminio, además de su alta puzolanidad.

Por otro lado se debe tener cuidado con la porosidad y el PH ya que puede llegar a disminuir la resistencia a la compresión y el nivel de pureza si los materiales no reaccionan como deben desde el inicio de la preparación de estos cementos.[1] además, el aumento del pH al adicionar KOH (hidróxido de potasio) disminuye la capacidad de unión de cloruros en un 35%, pero si pasa lo contrario aumenta el pH para los LC3-50% de caolinita calcinada en arcilla calcinada.

El metakaolin (MK) por su parte da resultados mecánicos excelentes a comparación de un CP y esto se debe a que el metakaolin reacciona con el carbonato de calcio formando hemicarboaluminatos, además este material reacciona mejor si es con piedra caliza ya que logra resistencias muy buenas, pero el consuno de hidróxidos de calcio podría carbonatarse más rápido lo que puede llegar a afectar la durabilidad. [51] Pero en conclusión el metakaolin y piedra caliza desde el primer día demuestran que es posible acoplar los con los cementos portland, ya que pueden ofrecer excelentes rendimientos a edades tempranas, como la mezcla B45% (30% MK y 15% piedra caliza) produce mejores propiedades mecánicas que un CP.

Pero en general los cementos LC3 (arcilla calcinada 30%, caliza 15%, Clinker 50% y yeso en un 5%) dan buenos resultados a la resistencia mecánica, durabilidad e hidratación, gracias a los avances tecnológicos que ayudan a que los resultados sean más confiados a comparación de un CP a la hora de realizarse alguna construcción civil. En la actualidad en Cuba e India ya se realizan casas modelos para comprobar la calidad de este cemento, que por el momento es exitosa y viable a corto plazo y posiblemente a largo plazo. Pero parte de ese éxito es gracias a las arcillas calcinadas de alta calidad que se consiguen en África, Asia y América Latina, pero también hay arcillas de otras partes del mundo que hay abundancia de material, pero la dificultad

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	Estudio de Vigilancia Tecnológica y estado del arte de los Cementos LC ³	FECHA: 2020 VERSIÓN 0
--	--	--


es su composición química que no logra activarse correctamente hasta alcanzar resultados similares a un CP.

4.2 RECOMENDACIONES

En estudios futuros se recomienda incluir cenizas volantes o cenizas vegetales, aunque no tienen un suministro limitado, se podría buscar formas para que nuevas mezclas los incluyan ya que pueden llegar a disminuir las emisiones de CO₂. Además, las cenizas volantes en la actualidad están disponibles, pero al usarlas más reducirían hasta en un 60% de las emisiones producidas por el cemento y concreto, pero a largo plazo es posible que no estén disponibles, ya que el mundo de la industria cementaria tendrá que parar de quemar carbón. También se debería fomentar el uso de componentes prefabricados, ya que hay gran cantidad de cemento desperdiciado, como es el caso de los sacos rotos en las obras de construcción que son desechados produciendo el 5% de emisiones CO₂. [1]


Los cementos LC3 son una solución adecuada para este problema ambiental que es causado por industrias cementarias, pero aun así se debe seguir investigando soluciones o nuevas mezclas que logren utilizar todas las arcillas calcinadas que están disponibles en muchos países ya que no se reactivan adecuadamente al entrar en contacto con otros materiales y esto se debe a su composición química por su bajo porcentaje de calcio, aluminio y sílice. Y esto causa afectaciones en la resistencia mecánica como la compresión, también a la hidratación y por consiguiente a su durabilidad.

Por ultimo las arcillas calcinadas pueden llegar a sustituir al Clinker en un mayor porcentaje solo hay que seguir buscando esos materiales que se mezclen adecuadamente a la arcilla, porque si se logra se podrá reducir más de 400 millones de toneladas de CO₂ cada año. Además, sería interesante profundizar en los aspectos específicos de la activación de las mezclas, ya que desde allí se puede encontrar un potencial en materiales que aún no nos atrevemos a usar o tal vez sí pero no se saben controlar esas reacciones. Y como Ingenieros no tenemos opción porque ya está cambiando el planeta por un mundo con construcciones civiles sostenibles.

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	Estudio de Vigilancia Tecnológica y estado del arte de los Cementos LC ³	FECHA: 2020 VERSIÓN 0
---	--	--


BIBLIOGRAFÍA

- [1] K. L. Scrivener, “Eco-efficient cements: No magic bullet needed,” *Glob. Cem. Mag.*, no. September, pp. 10–14, 2019.
- [2] J.D. OSORIO, “HISTORIA DEL CONCRETO,” ARGOS, 2020. .
- [3] L. Rodgers, “La enorme fuente de emisiones de CO2 que está por todas partes y que quizás no conocías,” *BBC NEWS*.
<https://www.bbc.com/mundo/noticias-46594783>.
- [4] “Cementos y Hormigones,” *cemyhor*.
- [5] pladesemapesga, “LOS EFECTOS AMBIENTALES DE LA PRODUCCION DEL CEMENTO,”
[Online]. Available:
<https://pladesemapesga.com/descargas/anexonotadeprensa-efectos-ambientales-del-clinker.pdf>.

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	Estudio de Vigilancia Tecnológica y estado del arte de los Cementos LC ³	FECHA: 2020 VERSIÓN 0
--	--	--

- [6] G. G. Fallas*, C. H. Madrigal, M. P. García, I. R. Valenciano, L. D. R. Vega, and G. S. Guzmán, "Efecto de la variación agua/cemento en el concreto," *Esc. Ing. los Mater. Tecnológico Costa Rica.*, vol. Vol. 25.
- [7] ARGOS, "Reducción Factor Clínter/Cemento," ARGOS. .
- [8] K. S. M. Antoni, J. Rossen, F. Martinela, "Cement and Concrete Research," *SciVerse*, no. Cem. Concr. Res.
- [9] P. K. Scrivener, "LC3," *SciVerse*, vol. 1, no. LC3, 2018.
- [10] N. L. Y. A. HERNANDEZ, "CEMENTOS CON CENIZA VOLANTE," *Univ. Catol. Colomb.*, vol. 1, no. CEMENTOS CON CENIZA VOLANTE, 2018.
- [11] R. Castillo* and J. F. M. 1, Rodrigo Fernández**, Mathieu Antoni*, Karen Scrivener*, Adrián Alujas*, "Activación de arcillas de bajo grado a altas temperatur," *SCIELO* Univ. Cent. Las Villas, St. Clara. Cuba ** Esc. Politécnica Fed. Lausana (EPFL). SUIZA.*
- [12] ARGOS, "CONCRETO," ARGOS, 2020. .
- [13] N. VILCA, "IMPACTO AMBIENTAL DE LA INDUSTRIA DEL CEMENTO," *ACADEMIA*, 2020. .
- [14] E. R. Adnan Enshassi¹, Bernd Kochendoerfer, "Evaluación de los impactos medioambientales de los proyectos de construcción," *Rev. Ing. construcción versión On-line ISSN 0718-5073*, vol. Rev. ing.
- [15] MUNDO, "El cemento contamina más que todos los camiones del mundo," *MUNDO*.
- [16] S. R. Valenzuela, "DISMINUCIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL DE LOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN EN BASE CEMENTO PARA UNA CONSTRUCCIÓN SOSTENIBLE."
- [17] O. CEMA, "LA RECUPERACIÓN DE RESIDUOS COMO COMBUSTIBLES," *CEMBUREAU*, vol. 1, no. LA RECUPERACIÓN DE RESIDUOS COMO COMBUSTIBLES.
- [18] ASOCEM, "¿Cuál es el proceso de fabricación del cemento?," ASOCEM. .
- [19] L. Rodgers, "CEMENTO," *BBC*, 2020. .

- [20] “¿Qué es el clinker? / Fases del Clinker,” *CEMENTOS Y HORMIGONES*.
- [21] R. Economía, “ARGOS CON CEMENTOS CON MENOS HUELLA DE CARBON,” *EL ESPECTADOR*. .
- [22] I. R. M. Rodríguez, “CEMENTO PORTLAND,” *Inst. Colomb. Prod. Cem.*, [Online]. Available: file:///D:/Datos Salvar/Downloads/Cemento.pdf.
- [23] J. N. L. LOZANO, “RESISTENCIA DE MORTEROS ACTIVADOS CON CENIZA VOLANTE,” Universidad la Gran Colombia, 2017.
- [24] CEMEX, “Cemento Blanco,” *CEMEX*, 2019. .
- [25] CONSTRUMATEMATICA, “No Title,” *Construpedia*. .
- [26] “¿Qué es el cemento Portland?,” *UMACON S.A.*, [Online]. Available: <http://www.umacon.com/noticia.php/es/que-es-el-cemento-portland-tipos-y-caracteristicas/413>.
- [27] P. M.-S. Isabe, “¿Que es el cemento portland?,” *UMACON S.A.*, 2017. .
- [28] E. Quishpillo, “Cemento puzolánico,” *ECOSUR*, 2019.
<https://www.redalyc.org/pdf/402/40210112.pdf>.
- [29] CEMEX, “PRODUCTOS CEMENTANTES,” *CEMEX*, 2020. .
- [30] O. J. SILVA, “GENERALIDADES Y TIPOS DE ADITIVOS PARA EL CONCRETO SEGÚN LA NTC 1299,” *ARGOS*, no. GENERALIDADES Y TIPOS DE ADITIVOS PARA EL CONCRETO SEGÚN LA NTC 1299, 2019.
- [31] Universidad Abierta Interamericana. Morteros, cemento, cal, yeso. Ensayos de construcción.
- [32] “MORTEROS,” *CONSTRUMATEMATICA*. .
- [33] A. Manzanero, “Morteros - Más Allá De La Bioconstrucción,” *Ecosistema*, 2020. .
- [34] CEMEX, “mortero,” *CEMEX*. .
- [35] L. Rodgers, “EL MUNOD,” *BBC*, 2018. .

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO	Estudio de Vigilancia Tecnológica y estado del arte de los Cementos LC ³	FECHA: 2020 VERSIÓN 0
--	--	--

- [36] M. MONZÓ1, “Cerámica y Vidrio,” *REPOSITORIO*, 2019. .
- [37] U. P. de L. (Suiza), “CEMENTO ARCILLA CALCINADA,” *ASOCEM*. .
- [38] S. Pires, “No Title,” *Cons. Super. Investig. Científicas*, vol. 1, 1973.
- [39] “HIDRATAACION DEL CEMENTO,” *ITANCAMVA*. .
- [40] L. M. Velez, “permeabilidad y porosidad,” *revistas tecnologicas*. .
- [41] M. O. M.* , “No Title,” *Investigador del IDIEM. Universidad de Chile.*, 1984..
- [42] universidad de Barcelona, “Cemento de aluminato de calcio CAC-R,” *materials*. .
- [43] P. L. ARANDA, “EFECTO DE LA ADICIÓN DE HIDRÓXIDO CÁLCICO SOBRE MEZCLAS CON ALTA SUSTITUCIÓN DE CEMENTO POR CENIZA VOLANTE,” 2014.
- [44] “pulzolánicas,” *WGBIS*, 2018. .
- [45] J. D. OSORIO, “RESISTENCIA MECÁNICA DEL CONCRETO Y RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN,” *ARGOS*, 2020.
<https://www.360enconcreto.com/blog/detalle/resistencia-mecanica-del-concreto-y-compresion>.
- [46] H. Maraghechi, F. Avet, H. Wong, H. Kamyab, and K. Scrivener, “Performance of Limestone Calcined Clay Cement (LC3) with various kaolinite contents with respect to chloride transport,” *Mater. Struct. Constr.*, vol. 51, no. 5, pp. 1–17, 2018, doi: 10.1617/s11527-018-1255-3.
- [47] S. D. Yimmy Silva, “CONCRETO AUTOCOMPACTANTE CON DIFERENTES NIVELES DE CENIZA VOLANTE Y ESCORIA DE COMBUSTIÓN DE CARBÓN,” *Rev. Colomb. Mater.*, vol. 5.
- [48] C. A. J. (Pedro L. Valdez, Alejandro Dura, Jorge M. Rivera, “CONCRETO FLUIDOS CON ALTOS VOLUMEN DE CENIZA VOLANTE,” *Cienc. Univ. AUTONIMA NUEVO LEON*, 2007.
- [49] N. A. L. CASTILLO and A. N. H. MORA, “OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES CEMENTADOS A BASE DE CENIZAS VOLANTES COMO USO ALTERNATIVO DEL CEMENTO PORTLAND,” *Univ. Catol. Colomb.*, 2018.
- [50] J. Ston and K. Scrivener, “Basic creep of limestone–calcined clay

cements: An experimental and numerical approach,” *Theor. Appl. Fract. Mech.*, vol. 103, no. June, p. 102270, 2019, doi: 10.1016/j.tafmec.2019.102270.

- [51] K. S. M. Antoni, J. Rossen, F. Martinela, “Cement substitution by a combination of metakaolin and limestone,” *ELSEVIER*.
- [52] F. Zunino and K. Scrivener, “Increasing the kaolinite content of raw clays using particle classification techniques for use as supplementary cementitious materials,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 244, p. 118335, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118335.
- [53] S. A. B. Maria C.G. Juengera, Ruben Snellingsb, “Supplementary cementitious materials: New sources, characterization, and performance insights,” *ELSEVIER*, no. 122, 2019.
- [54] M. L. Jose Mena a, Marcelo González a, José C. Remesar b,a, “Developing a very high-strength low-CO₂ cementitious matrix based on a multi-binder approach for structural lightweight aggregate concrete,” *ELSEVIER*, 2020.
- [55] C. Greek, “Durabilidad del concreto,” *CivilGreek*, 2020. <https://civilgeeks.com/2011/12/11/durabilidad-del-concreto/>.
- [56] . H. M. . F. A. . H. W. . H. K. and K. Scrivener, “Performance of Limestone Calcined Clay Cement (LC3) with various kaolinite contents with respect to chloride transport,” *Crossmark*.
- [57] F. Avet, E. Boehm-Courjault, and K. Scrivener, “Investigation of C-A-S-H composition, morphology and density in Limestone Calcined Clay Cement (LC3),” *Cem. Concr. Res.*, vol. 115, no. October 2018, pp. 70–79, 2019, doi: 10.1016/j.cemconres.2018.10.011.
- [58] L. A. F. Barrera, “Empleo de ceniza volante colombiana como material cementicio suplementario y sus efectos sobre la fijación de cloruros en concretos,” *Univ. Nac. Colomb.*, 2016.
- [59] O. J. SILVA and I. Civil, “¿CÓMO SE PRODUCE EL PROCESO DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO?,” *ARGOS*, 2020.
- [60] C. E. Alejandra Tironi, Ph.D; Alberto N. Scian, Ph.D; and Edgardo F. Irassar, “Blended Cements with Limestone Filler and Kaolinitic Calcined Clay: Filler and Pozzolan Effects,” *ASCE*, 2017.
- [61] F. Zunino and K. Scrivener, “Factors influencing the sulfate balance in pure phase C3S/C3A systems,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 133, no.

January, p. 106085, 2020, doi: 10.1016/j.cemconres.2020.106085.

- [62] J. Skibsted and R. Snellings, "Reactivity of supplementary cementitious materials (SCMs) in cement blends," *Cem. Concr. Res.*, vol. 124, no. May, p. 105799, 2019, doi: 10.1016/j.cemconres.2019.105799.
- [63] Z. Shi *et al.*, "Sulfate resistance of calcined clay – Limestone – Portland cements," *Cem. Concr. Res.*, vol. 116, no. November 2018, pp. 238–251, 2019, doi: 10.1016/j.cemconres.2018.11.003.
- [64] IECA, "COMPONENTES Y PROPIEDADES DEL CEMENTO," *IECA*, 2017. <https://www.ieca.es/componentes-y-propiedades-del-cemento/>.
- [65] K. S. François Avet •, "INVESTIGACION DE CEMENTO Y HORMIGON," *ELSEVIER*, 2018.
- [66] S. M. y S. B.) Arun C. Emmanuel, Palas Haldar, "SECOND PILOT PRODUCTION OF CALCINED CLAY CEMENT WITH LIMESTONE IN INDIA," *ELSEVIER*, 2018.
- [67] . H. M. . F. A. . H. W. . H. K. and K. Scrivener, "Performance of Limestone Calcined Clay Cement (LC3) with various kaolinite contents with respect to chloride transport," *26 JULY 2018*.
- [68] F. Avet and K. Scrivener, "Influence of pH on the chloride binding capacity of Limestone Calcined Clay Cements (LC3)," *Cem. Concr. Res.*, vol. 131, no. March, p. 106031, 2020, doi: 10.1016/j.cemconres.2020.106031.
- [69] J. S. Karen Scrivener, François Avet, Hamed Maraghechi, Franco Zunino and A. F. Wilasinee Hanpongpan, "Impacting factors and properties of Limestone Calcined Clay Cements (LC3)," *Lab. Constr. Mater. EPFL, CH- 1015 Lausanne, Switzerland*.